

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ  
ІВАНА ПУЛЮЯ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Філюк Ярослав Олександрович

УДК 621.314; 621.32

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**СВІТЛОТЕХНІЧНІ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ**

Спеціальність 05.09.07 – Світлотехніка та джерела світла

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора  
філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Я.О. Філюк

Науковий керівник:

Андрійчук Володимир Андрійович  
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Філюк Я.О.* Світлотехнічні установки з автономним живленням – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.07 – «Світлотехніка та джерела світла». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Робота присвячена дослідженню енергетичних характеристик сонячних елементів та акумулюючих систем, удосконаленню системи керування автономним живленням освітлювальних установок та впливу кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

Розроблено методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних батарей. Запропонована модель сонячної батареї. Експериментально визначено параметри даної моделі. Проведено моделювання впливу фактора ідеальності діода і зворотнього струму насичення діода на напругу холостого ходу сонячної батареї.

В якості акумулюючої системи для автономного джерела живлення освітлювальної установки запропоновано батарею із Li-ion акумуляторів та суперконденсаторів. Встановлено лінійну залежність ємності суперконденсатора від величини напруги зарядження. Експериментально визначено, що із збільшенням тривалості заряду суперконденсатора при номінальній напрузі збільшується час саморозряду. Запропоновано систему регулювання процесів заряду/розряду суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів з використанням пристрою балансування напруги на окремих їх елементах.

Запропоновано методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання. Проведено аналіз впливу тривалості хмарності протягом кожного місяця 2016-2017 рр. на

величину виміряних значень густини потоку сонячного випромінювання. Встановлено аналітичний зв'язок між середньодобовою поверхневою густиною енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності  $E_{сер}=f(N)$ . Проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці.

Наведено методику та проведено розрахунку 2-х типів сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення. Перший тип повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період та другий тип у весняно-літній період.

Виконано розрахунок автономного живлення зовнішнього освітлення 3-ох типів населених пунктів з різною кількістю населення: 2.8 млн (м. Київ), 218 тисяч (м. Тернопіль) та 8,7 тис (м. Ланівці)

**Ключові слова:** сонячна батарея, освітлювальна установка, суперконденсатор, світловий прилад, акумуляторна батарея, густина потоку сонячного випромінювання.

## SUMMARY

*Filiuk Ya.O.* Lighting installations with autonomous power supply. The qualification scientific work on the manuscript copyright.

Ph.D. thesis fin Engineering Sciences with major in 05.09.07 «Lighting engineering and light sources». Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2019.

The work deals with the research of output performance of solar cells and accumulating systems, improvement of control systems for self-contained power supply of lighting installations and impact of climatic conditions on power potential of solar radiation.

The methodology was developed and experimental installation was built for measuring photovoltaic performance of solar battery. Model of solar battery was

proposed. Performance characteristics of this model were experimentally determined. Simulation of impact of diode ideality factor and diode reverse saturation current on idle solar battery voltage was carried out.

Li-ion battery and supercondenser assembly was suggested as an accumulating system for self-contained power supply of lighting installation. Linear dependency of supercondenser capacity on the value of charging voltage was determined. It was experimentally stated that supercondenser self-discharge time increased when their charging duration at nominal voltage grew. Supercondenser and Li-ion battery charge/discharge regulation system using the device for voltage balancing on their separate elements was proposed.

The methodology and experimental installation for measuring and recording of solar radiation flux density were proposed. The analysis of monthly cloud amount in the years of 2016-2017 and its influence on the content of observed values of solar radiation flux density was carried out. Theoretical relations between daily average surface solar radiation flux density and daily average cloud amount  $E_{cep}=f(N)$  were established. Calculations of energy potential of solar radiation for the cities of Lviv, Khmelnytskyi, Ivano-Frankivsk and Chernivtsi were made.

The dissertation provides descriptions of methodology and calculations made for two types of solar energy units for outdoor lighting. The first type completely supplies power for outdoor lighting during autumn-winter period whereas the second type – in spring-summer period.

Calculations for outdoor lighting autonomous power supply of three types of cities with different population: 2.8M (Kyiv), 218K (Ternopil), 8,7K (Lanivtsi) were made.

**Keywords:** solar battery, lighting unit, supercapacitor, light instrument, battery, solar radiation flux density.

### Список публікацій здобувача:

1. Філюк Я.О. Система автономного питания внешнего освещения / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Светотехника и электроэнергетика. – 2017. – №1. – С. 17-22. *(Автором запропонована методика вимірювання та визначення параметрів сонячної батареї).*
2. Філюк Я.О. Акумуляючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 40-47. *(Автором запропоновано методику визначення електричних параметрів суперконденсаторів).*
3. Filyuk Y.O. Analysis of the energy potential of solar light of the western region of Ukraine with the account of climatic conditions / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // EUREKA: PHYSICS AND ENGINEERING. – 2017. – No 4. – P. 25-32. *(Автором запропоновано установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання та представлено аналітичні залежності густини потоку сонячного випромінювання від ступення хмарності).*
4. Filyuk Y.O. Research of energy potential of solar radiation in Ternopil / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2017. – Vol 85. – No 1. – P. 95-100. *(Автором розраховано густину енергії сонячного випромінювання для м. Тернополя та визначено вплив кліматичних умов на величину енергії сонячного випромінювання).*
5. Filyuk Y.O. Use of solar energy for the outdoor lighting of Ternopil / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2017. – Vol 87. – No 3. – P. 126–133. *(Автором проведено аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території Тернополя протягом п'яти останніх років).*
6. Filyuk Y.O. Autonomous power supply system for outdoor illumination of residential areas in the territory of Ukraine / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2018. – Vol 89. – No 1. – P. 113-121. *(Автором запропоновано методику розрахунку автономної системи живлення зовнішнього*

*освітлення населених пунктів Тернопільської області).*

7. Пат. №116216 Україна : МПК (2017.01) H02J 7/00. Прилад балансування напруги на окремому суперконденсаторі акумулюючої батареї від перезаряду / Філюк Я.О., Андрійчук В.А., Липовецький М.М; заявник і патентоотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № 201612215; заявл.01.12.2016 ; опублік. 10.05.2017, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова).*

8. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням // V Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 23-27 лютого 2015 року. – Т.: ТНТУ, 2015. – С. 115-116.

9. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей з акумулюючими елементами / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, В.П Коваль // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року. – Т.: ТНТУ, 2015. – С. 185-186. *(Автором запропоновано систему керування роботою світлового прилада).*

10. Філюк Я.О. Освітлювальні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей та іоністорів / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій, 25 листопада 2015 року. – Т.: ТНТУ, 2015.– С. 129-130. *(Автором запропоновано експериментальну установку для дослідження параметрів суперконденсаторів).*

11. Філюк Я.О. Вимірювання енергії сонячного випромінювання на широті Тернопільського регіону/ Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18 травня 2016 року. – Т.: ТНТУ, 2016. – С. 175. *(Автором розроблено установку для дослідження густини потоку сонячного*

*випромінювання).*

12. Filyuk Y.O. Lighting installation autonomous power systems / V.P. Koval, Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // ICEPOM-10 CONFERENCE ABSTRACTS: зб. тез доповідей X міжнародної конференції ICEPOM-10, 23-27 травня 2016 року. Тернопіль. – С. 54. *(Автором запропоновано акумулюючі системи для світлотехнічних установок з автономним живленням).*

13. Філюк Я.О. Використання суперконденсаторів для автономного живлення установок із світлодіодними джерелами світла / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, А.Р. Малюга // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17 листопада 2016 року. – Т.: ТНТУ, 2016. – С. 202-203. *(Автором проведено дослідження саморозряду суперконденсаторів).*

14. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року. – Т.: ТНТУ, 2017. – С. 176-177. *(Автором запропоновано методику розрахунку інтенсивності потоку сонячного випромінювання).*

15. Філюк Я.О. Використання даних метеослужб для оцінки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук. // Матеріали III всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року. – Т.: ТНТУ, 2017. – С. 233. *(Автором проведено дослідження сонячного випромінювання в м. Тернополі ).*

16. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // VI Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 30 січня 2018 року. – Т.: ТНТУ, 2018. – С. 13-14. *(Автором запропоновано освітлювальну установку з автономним живленням).*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	
1.1. Стан зовнішнього освітлення населених пунктів України.....	17
1.2. Аналіз освітлювальних установок зовнішнього освітлення з автономним живленням.....	23
1.2.1. Джерела автономного живлення освітлювальної установки	29
1.2.2. Акумуляюючі батареї для освітлювальних установок з автономним живленням .....	33
1.2.3. Контролери заряду акумуляторних батарей.....	40
Висновки .....	43
РОЗДІЛ 2. ДЖЕРЕЛО АВТОНОМНОГО ЖИВЛЕННЯ ОУ НА БАЗІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	
2.1. Вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних елементів	44
2.2. Побудова моделі сонячної батареї.....	49
2.3. Блок накопичення електричної енергії.....	53
2.4. Системи балансування напруги на окремих елементах акумуляюючої системи.....	59
Висновки .....	61
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	
3.1. Вимірювання потоку сонячного випромінювання.....	63
3.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території.....	66
3.2.1. Результати дослідження густини потоку сонячного	



випромінювання на широті м. Тернополя.....	66
3.2.2. Вплив ступеня хмарності на густину енергії сонячного випромінювання.....	74
3.3. Використання результатів досліджень для моніторингу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Західного регіону України.....	85
Висновки .....	88
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ ТА ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	
4.1. Розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів.....	89
4.2. Техніко-економічний розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів.....	94
4.3. Світлотехнічний розрахунок ОУ .....	100
4.4. Аналіз ефективності роботи автономної енергетичної установки для зовнішнього освітлення.....	102
Висновки .....	106
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	109
Додаток А .....	121
Додаток Б .....	122
Додаток В .....	126
Додаток Г .....	134

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АКБ – акумуляторна батарея

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ККД – коефіцієнт корисної дії

ОУ – освітлювальна установка

СБ – сонячна батарея

СК – суперконденсатори

СП – світловий прилад

ФЕП – фотоелектричний перетворювач

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вуличне освітлення є невід'ємною частиною інфраструктури будь-якого населеного пункту. Витрати на зовнішнє освітлення в населених пунктах становить близько 30% від всіх витрат на електроенергію, із врахуванням додаткових витрат на обслуговування, що складає досить значну частку в структурі бюджету населених пунктів.

Однією з основних завдань і цілей в області енергозбереження у системах зовнішнього освітлення, а також підвищення енергетичної ефективності є часткове заміщення традиційних ресурсів на альтернативні джерела енергії. Це дозволить знизити вартість затрат, а також підвищити стабільність їх роботи та комфорт мешканців населених пунктів. В першу чергу, до таких джерел відносяться сонячні енергетичні системи, що працюють за принципом прямого перетворення сонячної енергії в електричну. Використання сонячних батарей в енергетиці має багато переваг над іншими альтернативними джерелами. Це висока надійність, низькі витрати коштів при експлуатації, модульність конструкції батарей, низькі витрати на будівництво електростанцій. Сонячні батареї в даний час є найбільш перспективними серед альтернативних джерел енергії.

На сьогодні цей напрямок альтернативної енергетики розвивається дуже інтенсивно. Враховуючи те, що потік сонячної енергії змінюється в залежності від особливостей добового і річного руху Землі, а також від кліматичних умов, потрібно мати системи, які акумулюватимуть енергію, а також раціонально її розподілятимуть. Для попереднього накопичення електроенергії використовують акумулюючі елементи різного типу. На сьогодні інтенсивно впроваджуються Li-ion акумулюючі батареї, які мають більш широкий температурний діапазон експлуатації та менший саморозряд, ніж кислотні та лужні акумулятори. В той же час швидко розвиваються та впроваджуються ємнісні накопичувачі електроенергії - суперконденсатори (СК) або іоністори. Вони можуть не тільки накопичувати

необхідну електроенергію, але й швидко віддавати її в навантаження та витримувати велику кількість зарядних - розрядних циклів без погіршення енергетичних характеристик. Ці нелінійні накопичувальні елементи займають проміжну область між акумуляторами і лінійними конденсаторами. Вони витримують більше мільйона зарядно-розрядних циклів без руйнування внутрішньої структури, що в 500 разів більше, ніж літій-іонні акумулятори.

Дослідженнями сонячної енергії та акумулюючим елементами займалися такі вчені як: Козирський В.В., Коваль В.П., Кожем'яко В.П., Желих В.М., Щерба А.А., Супруновська Н.І., Burke A., Miller M., та інші. Незважаючи на отримані результати, залишається ряд завдань, які не до кінця вирішені, а саме: аналізу енергетичної ефективності світлотехнічних установок з автономним живленням, встановлення зв'язку між енергетичним потенціалом сонячного випромінювання та кліматичними умовами даної місцевості, раціональним акумулюванням сонячної енергії та її використання в темний час доби. Потреба в таких установках виникає в місцях де відсутні електричні мережі, а також у різного типу туристичних базах у гірських районах.

Тому **актуальним** є дослідження освітлювальних установок з автономним живленням на основі сучасних сонячних систем генерування електричної енергії та вплив на них кліматичних умов, а також акумулювання і раціональне використання накопиченої електроенергії.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової теми «Вплив динаміки експлуатаційних параметрів на енергоефективність джерел світла» (номер державної реєстрації 0113U000248).

### **Мета й завдання дослідження**

Метою роботи є удосконалення системи керування автономним живленням освітлювальних установок, дослідження енергетичних характеристик сонячних батарей та акумулюючих систем і використання їх в системах зовнішнього

освітлення, а також дослідження впливу кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити властивості сонячних батарей і акумулюючих елементів із суперконденсаторів для автономного живлення освітлювальної установки;
- розробити методику та виготовити експериментальної установки для вимірювання потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу;
- визначити вплив кліматичних умов території на енергетичні характеристики сонячного випромінювання;
- розробити систему керування роботою автономного джерела живлення освітлювальної установки;
- провести розрахунок енергетичної ефективності освітлювальної установки з автономним живленням на основі сонячних батарей та суперконденсаторів.

**Об’єкт дослідження** – процеси генерування електричної енергії сонячними фотоелектричними перетворювачами, акумулювання та використання її в освітлювальних установках.

**Предмет дослідження** – фотоелектричні перетворювачі та акумулюючі системи із суперконденсаторів і Li-ion акумуляторів для автономного живлення світлодіодних систем зовнішнього освітлення.

**Методи дослідження.** Поставлені завдання вирішувалися на основі використання методів вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних батарей; методу циклування; методів теорії електричних кіл та схемотехніки; сучасних програм моделювання світлотехнічних характеристик освітлювальних установок.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Удосконалено математичну модель системи «сонячна енергетична установка – освітлювальна система» в режимі максимальної потужності.

2. Вперше встановлено зв'язок між середньодобовою густиною потоку енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності території.

3. Вперше отримано помісячні аналітичні залежності середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступення хмарності.

4. Вперше проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання території західного регіону України з врахуванням кліматичних умов.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Запропоновано методику та розроблено автоматизовану систему вимірювання і запису енергетичного потоку сонячного випромінювання.

2. Розроблено та апробовано програму статистичної обробки часових характеристик густини потоку сонячного випромінювання протягом кожного місяця.

3. Розроблено установку для контролю параметрів суперконденсаторів та пристрій балансування напруги на окремих елементах акумулюючої батареї, який захищений патентом на корисну модель №116216.

4. Запропоновано методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для населених пунктів з населенням: 2.8 млн (м. Київ), 218 тисяч (м. Тернопіль) та 8,7 тис (м. Ланівці).

5. Запропоновано шляхи підвищення енергетичної ефективності освітлювальних установок з автономним живленням.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В [68] описано методику вимірювання та визначено параметри максимальної потужності споживача, коефіцієнт заповнення вольт-амперних характеристик, зворотній струм насичення р-n- переходу сонячної батареї, в [98,99,103] представлено експериментальну

установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання та аналіз часового розподілу густини потоку сонячної енергії і розраховано густину енергії сонячного випромінювання для м. Тернополя. Визначено вплив кліматичних умов на величину енергії сонячного випромінювання. Отримано аналітичні залежності на основі співставлення вимірних значень густини потоку сонячного випромінювання та ступення хмарності взятих із даних метеослужб. В [85] удосконалено методику експериментального визначення ємності та внутрішнього опору суперконденсаторів. Проведено експериментальне дослідження процесів перерозподілу між внутрішніми шарами суперконденсатора попередньо накопиченого заряду та впливу на такий перерозподіл тривалості витримки зарядженого суперконденсатора під напругою. У [85,86] представлено розробку пристрою балансування напруги на окремому елементі суперконденсатора. В [102,103] запропоновано методику розрахунку автономної системи живлення зовнішнього освітлення населених пунктів та проведено техніко-економічний розрахунок автономної енергетичної системи зовнішнього освітлення.

**Апробація.** Основні результати дисертації були оприлюднені та обговорювалися на наукових конференціях:

1. V міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 23-27 лютого 2015 року м.Тернопіль;
2. Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року м.Тернопіль;
3. IV міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій, 25 листопада 2015 року м.Тернопіль;
4. XIX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18 травня 2016 року м.Тернопіль;

5. X міжнародна конференція ICEROM-10, 23-27 травня 2016 року, м.Тернопіль;
6. V міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17 листопада 2016 року м.Тернопіль;
7. XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року м.Тернопіль;
8. III всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року, м.Тернопіль;
9. VI міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 30 січня 2018 року м.Тернопіль-Яремче.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 16 робіт, зокрема 6 статей у науково-технічних фахових виданнях, з них 1 в іноземному виданні, та 1 у виданні, що входить в наукометричну базу Scopus, 1 –патент України на корисну модель та 9 тез доповідей на конференціях.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 109 найменувань, 4 додатків, містить 57 рисунків, 22 таблиці. Повний обсяг роботи складає 136 сторінки.



## РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Стан зовнішнього освітлення населених пунктів України

Питання ефективного використання природних ресурсів, вдосконалення систем споживання електричної енергії, впровадження екологічних технологій в побуті і на виробництві залишається актуальним. Одним з основних завдань і ціллю в області підвищення енергетичної ефективності є часткове заміщення традиційних ресурсів на відновлювальні джерела енергії, останнім часом яким приділяється багато уваги [1-4]. Використання альтернативних джерел енергії в системах зовнішнього освітлення дозволить знизити вартість затрат, а також підвищити стабільність їх роботи та комфорт мешканців населених пунктів.

Для характеристики систем зовнішнього освітлення населених пунктів України використано наступні параметри: протяжність мереж зовнішнього освітлення (табл. 1.1), загальна кількість спожитої електроенергії, кількість світлоточок з різними типами джерел світла, кількість електроенергії, спожитої світлоточкою (табл. 1.2-1.3) [5]. На сьогоднішній день в статистичних звітах організацій міськсветла, населених пунктів України, відсутні дані про автономні системи живлення зовнішнього освітлення, тому вони не приведені в (табл. 1.1-1.3).

Загальна протяжність електромереж зовнішнього освітлення станом на 01.01.2018 року становила 109,8 тис. км. і за 2017 рік збільшилася на 11 тис. км. порівняно з 2016 роком. У 2017 році було спожито 588,8 млн. кВт·год електроенергії для зовнішнього освітлення. Цей показник збільшився на 71,6 млн. кВт·год в порівнянні з 2016 роком. Витрати на електроенергію, спожиту на зовнішнє освітлення, збільшилися протягом року на 437,24 млн. грн. і становлять 990,24 млн. грн. Середня вартість річного енергоспоживання однієї світлоточки становить 367,7 грн., що на 112,5 грн. більше, ніж у 2016 році.

Таблиця 1.1

## Протяжність мереж зовнішнього освітлення

Адміністративно-територіальний поділ	Всього, км		Кабельні, км		Повітряні, км	
	За 2016 рік	За 2017 рік	За 2016 рік	За 2017 рік	За 2016 рік	За 2017 рік
Вінницька	4901,85	5253,185	357,72	489,47	4522,43	4763,715
Волинська	1270	1396	385,5	426,8	884,5	969,2
Дніпропетровська	10028,7	10538,99	2049,89	2144,25	7978,81	8394,74
Донецька	4984,5	5340,499	1471,27	1580,257	3513,25	3760,242
Житомирська	2049,3	3240,1	735,1	283,84	1314,2	2956,26
Закарпатська	3627,25	3737,99	443,6	446,5	3183,65	3291,49
Запорізька	3707,16	4662,21	621,74	470,2	3085,42	4192,01
Івано-Франківська	1899,05	2169,6	637,99	714,5	1261,06	1455,1
Київська	7443,42	8148,74	1464,4	1858,99	5979,02	6289,75
Кіровоградська	3585,9	3688,3	79,4	65	3506,5	3623,3
Луганська	1216,9	1378,3	78,5	79	1138,5	1299,3
Львівська	4875,73	4863,85	430,28	441,21	4445,45	4422,64
Миколаївська	4114,1	4192,2	910	953,38	3204,1	3238,82
Одеська	5950,44	6586,276	1301,77	1472,685	4648,67	5113,591
Полтавська	4094,2	4380	364,7	410	3729,5	3970
Рівненська	2247,44	2694,24	134,57	175,3	2112,87	2518,94
Сумська	4717,87	5016,657	201,56	252,122	4516,31	4764,535
Тернопільська	1826,9	2664,8	206,33	313,3	1620,57	2351,5
Харківська	7412	8049,96	1455	1442,72	5896	6607,24
Херсонська	1226	1630,5	137	137,4	1089	1493,1
Хмельницька	3268,01	4136,981	400,947	596,817	2867,06	3540,164
Черкаська	6273,059	7113,674	194,178	215,834	6078,88	6897,84
Чернівецька	1541,09	1609,56	74,09	86,53	1467	1523,03
Чернігівська	2342,3	3114,9	129,5	173,6	2212,8	2941,3
м.Київ	4156,8	4190,6	1862,5	1881,9	2294,3	2308,7
Всього по Україні:	98759,969	<b>109798,1</b>	16127,5	<b>17111,605</b>	82549,8	<b>92686,50</b>

Загальна кількість світлоточок зовнішнього освітлення станом на 01.01.2018 становить 5,39 млн. одиниць, що на 3,3 *млн.* більше, ніж у 2016 році. У сфері зовнішнього освітлення використовується 303,546 тис. ламп розжарювання, 1464,16 тис. люмінесцентних ламп, 1072,79 тис. ртутних, 1786,06 тис. натрієвих, 53,146 тис. металогалогених і 708,215 тис. енергоощадних світлодіодних джерел світла, що на 456,175 тис. більше у порівнянні з відповідним показником 2016 року.

Таблиця 1.2

## Показники зовнішнього освітлення

Адміністративно-територіальний поділ	Кількість спожитої електроенергії – всього, <i>тис. кВт·год</i>		Кількість електроенергії, спожитої світлоточкою, <i>кВт·год</i>		Витрати на електроенергію, спожиту на зовнішнє освітлення, <i>тис. грн.</i>	
	За 2016 рік	За 2017 рік	За 2016 рік	За 2017 рік	За 2016 рік	За 2017 рік
Вінницька	15620,89	17135,40	197	201	17819,44	33555,8
Волинська	7618,2	8008,1	165,8	198,6	9668	18954,2
Дніпропетровська	37921,42	71054,42	166,962	293,845	52554,37	110938,1
Донецька	27892,631	33969,06	318,9	349,6	37389,61	66512,84
Житомирська	7151	7953	160,47	136,68	4290,6	18530
Закарпатська	13316,24	16382,77	232,2	217,08	12851,84	29870,87
Запорізька	21352,7	24516,38	171	214,02	11029,53	37955,81
Івано-Франківська	9921,73	9833,452	236,7	186,4	12392,3	18781,91
Київська	40303	51673,94	352,1	389,64	11507,9	59533,21
Кіровоградська	10164,028	9873,306	182,7	162,1	8832,6	18691,8
Луганська	4082,8	4092,8	232,8	197	4917,1	9656,7

Продовження таблиці 1.2

Львівська	40837,02	48397,17	385	446,3	39763	68809,2
Миколаївська	18189	17556,34	237,74	206,4	21618	36441,9
Одеська	45672,8	47199,87	6597,99	6329,735	46916,9	72424,23
Полтавська	12600	12200	120	98	12400	10130
Рівненська	14525,07	14207,08	333,83	293,06	10577,1	20782,8
Сумська	17123,9	17905,9	238,1	222,75	19393,6	34185,3
Тернопільська	6759,352	6948,2	204,85	213,7	7883,5	15961,8
Харківська	48052	48392,1	339,9	231,7	52564,8	91840,9
Херсонська	8540	9875,25	315	315	6207	14056,5
Хмельницька	16418,269	17501,34	221,815	8,09	18645,63	18645,63
Черкаська	17683,369	18125,33	210,5	197,5	20922,28	34386,57
Чернівецька	7988,2	7114,1	250,5	136,2	9477,28	11543,2
Чернігівська	6383,4	9427,6	119,88	87,77	6064,2	20769,8
м.Київ	61047	59440	339	328,8	77621	117279,4
Всього по Україні:	<b>517164,01</b>	<b>588782,9</b>	<b>12330,7</b>	<b>11660,97</b>	<b>533307,6</b>	<b>990238,4</b>

Таблиця 1.3

Кількість світлоточок за типами джерел світла за 2016 рік

Адміністративно-територіальний поділ	Кількість світлоточок за типами джерел світла, тис. шт.					
	Лампи розжарювання	Люмін ісцентні	Ртутні	Натрієві	Металогенні	Світлодіодні джерела світла
Вінницька	5,136	16,815	6,888	33,034	0,622	22,71
Волинська	3,16	9,963	5,83	16,9	0,06	9,825
Дніпропетровська	23,35	115,69	11,34	38,2	0,46	52,77
Донецька	7,143	10,104	10,077	53,336	0,506	15,994

Продовження таблиці 1.3

Житомирська	4,492	8,506	5,143	14,505	0,322	24,29
Закарпатська	17,275	19,777	14,011	16,024	0,612	7,77
Запорізька	7,47	28,47	7,88	41,17	0,37	29,18
Івано- Франківська	3,136	12,23	5,755	18,19	0,645	12,81
Київська	14	22,9	37,56	31,2	4,221	22,74
Кіровоградська	13,602	12,011	2,611	16,301	0,141	16,259
Луганська	0,67	6,063	0,637	7,076	0,087	6,243
Львівська	15,71	11,42	10,88	47,03	4,04	19,36
Миколаївська	6,772	1,498	10,289	27,629	4,897	33,982
Одеська	40,774	20,082	6,076	68,896	4,543	25,811
Полтавська	11	17	17	70	3	6
Рівненська	2,762	14,508	7,357	13,373	0,23	10,249
Сумська	19,97	12,18	14,75	19,01	0,11	14,37
Тернопільська	9,653	15,793	3,668	11,648	0,022	9,512
Харківська	3,893	29,3445	6,233	36,575	21,141	69,602
Херсонська	3,65	5,65	4,2	11,35	0,1	6,4
Хмельницька	76,924	1020,352	838,76	1022,62	2,258	212,535
Черкаська	5,521	36,88	16,411	17,686	1,81	13,482
Чернівецька	2,303	5,727	3,231	20,703	0,439	8,721
Чернігівська	4,78	9,6	7,7	16,9	0,31	16,2
м.Київ	0,4	1,6	18,5	116,7	2,2	41,4
Всього по Україні:	<b>303,546</b>	<b>1464,163</b>	<b>1072,7</b>	<b>1786,06</b>	<b>53,146</b>	<b>708,215</b>

В роботі багато уваги буде приділено системам зовнішнього освітлення м. Тернополя та населеним пунктам Тернопільської обл. Характеристики

світлотехнічних систем зовнішнього освітлення м. Тернополя за 2014-2016 рік, згідно даних КП «Тернопільміськвітло», наведена в табл. 1.4.

У 2016 році в м. Тернополі було спожито близько  $W_{oc} = 3$  млн. кВт·год електроенергії для зовнішнього освітлення. Цей показник збільшився на 0,19 млн. кВт·год (6 %) в порівнянні з 2015 роком, а на 0,26 млн. кВт·год (8,5 %) в порівнянні з 2014 роком. Витрати на електроенергію, спожиту на зовнішнє освітлення, збільшилися протягом 2016 року на 1,926 млн. грн. (52 %) і становлять 3,65 млн. грн. Графіки цих змін приведені на рис. 1.1.. Та вже сьогодні є можливість набагато зменшити витрати електроенергії на вуличне освітлення, використовуючи альтернативні джерела енергії, а саме сонячну енергетику.

Таблиця 1.4

Спожита енергії по м. Тернополю за 2014 – 2016 рік

Місяць	2016 рік		2015 рік		2014 рік	
	$W_{oc}$ , кВт·год	Сума з ПДВ, грн.	$W_{oc}$ , кВт·год	Сума з ПДВ, грн.	$W_{oc}$ , кВт·год	Сума з ПДВ, грн.
Січень	378479	225327,04	358080	180065,7	361028	138800,69
Лютий	331628	201369,16	326007	163241,64	288645	114195,69
Березень	262031	272128,08	245677	145104,78	248674	108175,15
Квітень	247283	316615,55	251398	160638,82	229125	107629,49
Травень	191166	262124,78	162687	115891,79	195455	106541,96
Червень	155271	211035,27	147566	100053,98	155642	84374,01
Липень	122452	172147,9	124275	82617,39	146096	78886,81
Серпень	154740	221415,26	154256	103010,13	145116	76264,01
Вересень	234089	335650,68	222651	151490,3	207923	112283,15
Жовтень	261248	390603,54	233795	153409,52	245428	127206,15
Листопад	332402	507049,73	293809	177976,43	275132	130552,6
Грудень	354216	534651,44	315762	190560,12	269110	129418,98
<b>Всього</b>	<b>3025005</b>	<b>3650118,43</b>	<b>2835963</b>	<b>1724060,6</b>	<b>2767374</b>	<b>1314328,6</b>

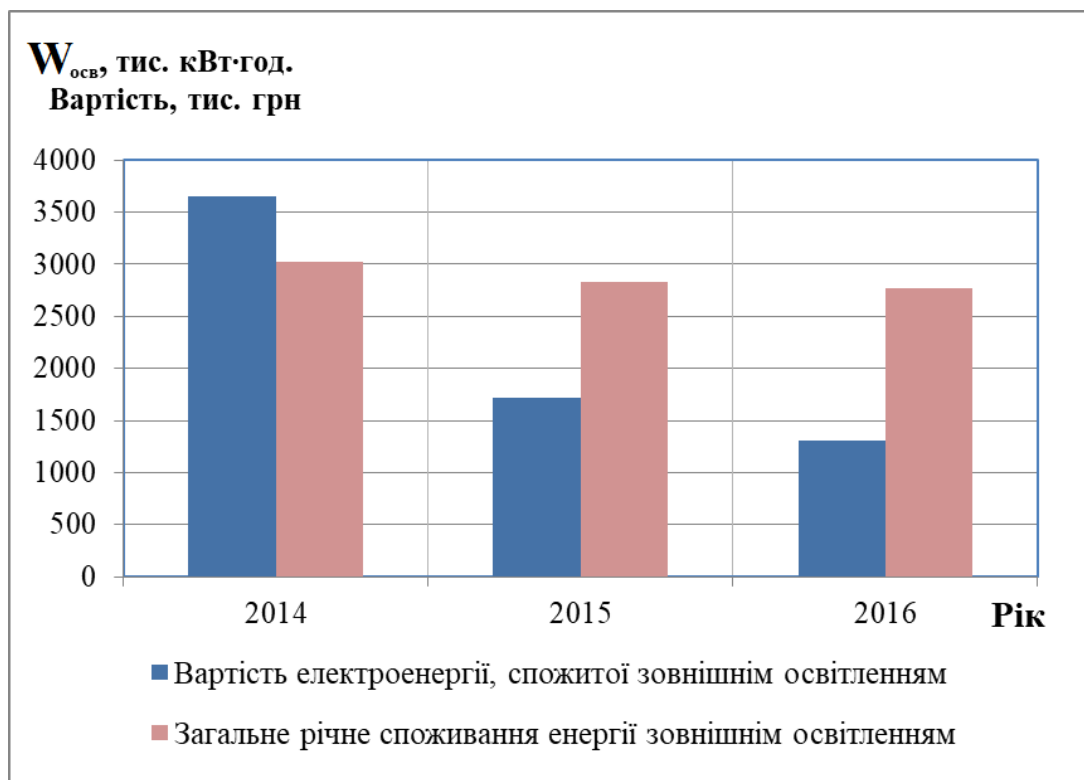


Рис. 1.1. Графік зміни сумарної річної енергії, спожитої зовнішнім освітленням  $W_{осв.}$ , і її вартість для м. Тернополя

## 1.2. Аналіз освітлювальних установок зовнішнього освітлення з автономним живленням

У наш час має велике значення використання світлодіодних ОУ з автономними джерелами електроенергії. В Україні багато місць, де є необхідність у вуличному та садово-парковому освітленні, в освітленні доріг, але немає можливості або існують труднощі підключення до магістральних джерел електроенергії. Для вирішення даної проблеми використовуються автономні освітлювальні установки, що використовують альтернативні джерела енергії.

На сучасному етапі розвитку зовнішнього освітлення автономні світильники на сонячних батареях виробляються багатьма фірмами. Так прикладом практичного втілення в життя освітлення від альтернативних джерел енергії на даний час є

1. Shenzhen Shinehui Technology Co.
2. Sun Shines, г. Москва.
3. Towersun-128, EPS-soltec.

Компанія Shenzhen Shinehui Technology Co., виготовляє інтегровані вуличні освітлювальні установки на сонячних батареях, зовнішній вигляд представлено на рис. 1.2 [6].

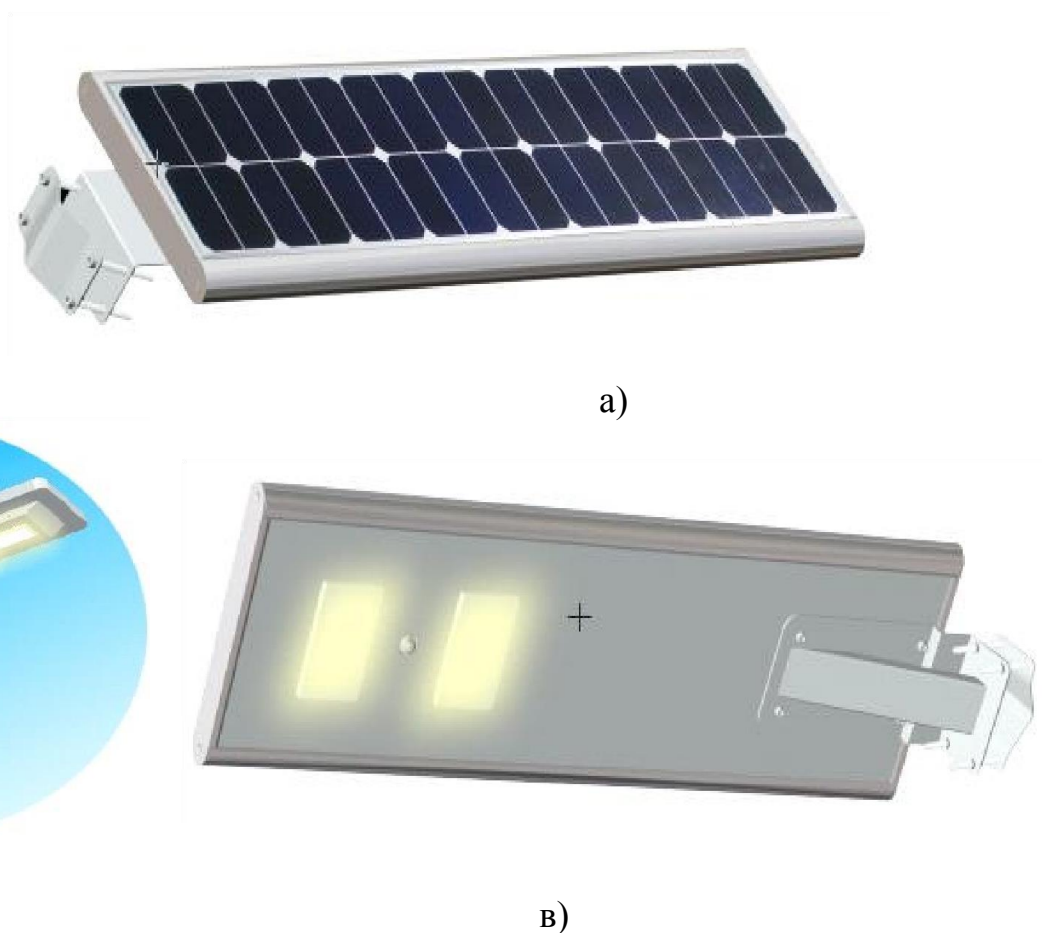


Рис. 1.2. Інтегрована вулична освітлювальна установка на сонячній батареї:  
а) Сонячна батарея; б) Приклад монтажу на опорі; в) Вигляд знизу на світлодіодні модулі і датчик руху

Технічні характеристики інтегрованої освітлювальної установки на сонячній батареї представлені в табл. 1.5.



Таблиця 1.5

## Характеристики інтегрованого світильника виробництва Китай

№	Характеристика	Значення
1	Сонячна батарея	Максимальна потужність 60 Вт (монокристалічний кремній)
2	Акумулятор	Літій-іонний 12.8В
3	Світлодіодний модуль	Максимальна напруга 12 В, потужність 40Вт, 4400 лм, Датчик руху
4	Час заряду	6 годин
5	Час розряду	15 годин повної потужності, 30 годин половини потужності
6	Робоча температура	0 +70 °С
7	Кольорова температура	6000k
8	Висота установки	7-8 метрів
9	Рекомендована відстань між опорами	18-20 метрів

Всі функціональні елементи даного пристрою розташовані в одному корпусі, що розміщується на вершині опори. Даний ліхтар може знайти своє застосування в усіх областях України.

Компанія «Sun Shines» виготовляє автономні системи освітлення, які встановлюється на наявні опори з діаметром 76 або 89 мм [7].

Комплект системи призначений для заміни традиційних вуличних світильників з живленням від мережі, а також для освітлення ділянок, на яких утруднене і неможливе підведення електричної енергії. Автономна система освітлення незамінна для освітлення доріг поза населеними пунктами, зупинок громадського транспорту поза населеними пунктами, віддалених об'єктів, де відсутня електрична мережа, а також для освітлення вулиць, дворових зон, автомобільних парковок, пішохідних переходів [7]. Можливе використання світильників з вбудованими датчиками руху з радіусом дії 12-15 метрів.

Зовнішній вигляд «Сонячна електростанція Sun Shines 100/65» зображений на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд установки Sun Shines 100/65

Таблиця 1.6

Технічні характеристики автономної системи

№	Характеристика	Значення
1	Потужність сонячної батареї	100 Вт
2	Акумулятор	65 А·год
3	Тип світильника	світлодіодний
4	Потужність світильника	20 Вт
5	Світловий потік	2200 лм
6	Час роботи без підзарядки	48 год
7	Робоча напруга	12 В
8	Температура експлуатації	від -40 до +85 °С

Компанія Towersun-128, EPS-soltec [8] виготовляє освітлювальні установки, які використовують сонячну енергію для тих випадків, коли неможливо

підключитися до мережі. Завдяки використанню восьми сонячних модулів, що розміщуються один над одним, навіть при розсіяному світлі можна домогтися високої ефективності сонячної ОУ. Ідеальні місця використання ОУ TOWERSUN - житлові вулиці, тротуари, автостоянки і т.д. Зовнішній вигляд фотоелектричної установки Towersun-128, EPS-soltec представлений на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Фотоелектрична установка Towersun-128, зовнішній вигляд

TOWERSUN - це вулична світлодіодна ОУ на сонячних батареях, яка може встановлюватися в будь-якому місці, де відсутні джерела електрики і потрібна надійна робота навіть в умовах поганої освітленості. Завдяки кубічній алюмінієвій конструкції з 2х4 фотоелектричними модулями, можна отримувати достатньо енергії від розсіяного світла, особливо в районах з поганими погодними умовами. Перпендикулярне розміщення модулів перешкоджає відкладенню снігу взимку. Унікальні функції енергозбереження забезпечують надійну роботу протягом декількох ночей навіть в погану погоду [8]. У відповідності з європейським стандартом DIN EN13201, завдяки показникам освітленості, освітлювальну установку TOWERSUN рекомендується встановлювати на вулицях житлових районів, на другорядних дорогах і парковках. Вбудований акумулятор

заряджається протягом дня за допомогою 8 фотоелектричних модулів, а при настанні темного часу доби ця енергія використовується для живлення світлодіодної лампи.

Криві розподілу світла СП, встановленого в Towersun-128 представлені на рис. 1.5.

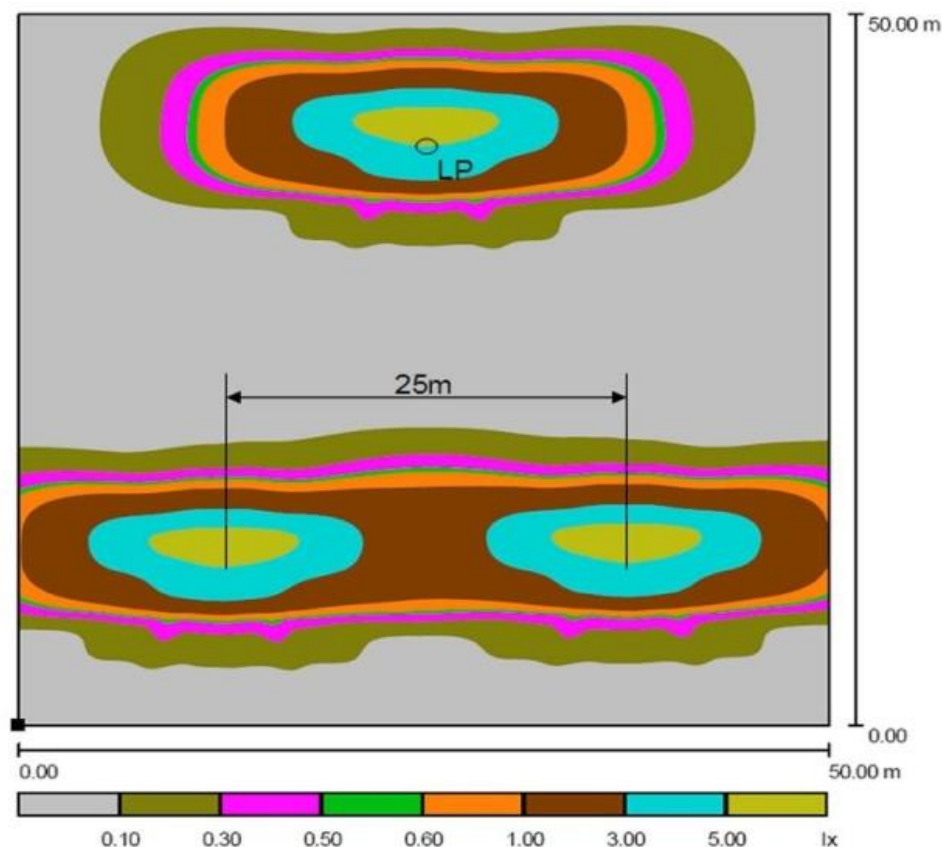


Рис. 1.5. Крива розподілу інтенсивності світла DIALux, один і два СП  
TowerSun

Крім великих моделей TOWERSUN 128 є також моделі, що розширюють сферу застосування ОУ сімейства TOWERSUN: TOWERSUN 64 зі зниженою світловіддачею, молодша модель TOWER-LIGHT з додатковою функцією напрямку світла в варіанті для пішохідних зон і площ і STATIONSUN, призначена для зупинок громадського транспорту.

### 1.2.1. Джерела автономного живлення освітлювальної установки

Для автономного живлення зовнішнього освітлення населених пунктів в роботі [9] запропоновано фотоелектричні модулі типу KB50/12-M, акумулюючі батареї Santec 12-200 та світлові прилади типу LED 2.80.4200 потужністю 80 Вт. В роботі [10] проведено аналіз комбінованої системи живлення освітлювальних установок (ОУ), яка включає автономне живлення і живлення з використанням електричної мережі. В [11] показана технічна можливість реалізації автономної системи вуличного освітлення, з використанням сонячних батарей YL300C-30b, потужністю 300 Вт, Li-ion акумуляторних батарей типу LT-LYP200 ємністю 200 А·год, інверторів MeanWell TS-3000(1500) 48 В та контролерів заряду ECO Енергія MPPT Pro 200/100.

У роботі [12] представлений варіант використання автономних енергозберігаючих систем освітлення в парковій зоні з використанням світлодіодного світлового приладу LED-22 24 В потужністю 30-40 Вт, який має направлений світловий потік і оптичну систему для більш ефективного застосування. Зовнішній вигляд автономної системи освітлення представлено на рис. 1.6.

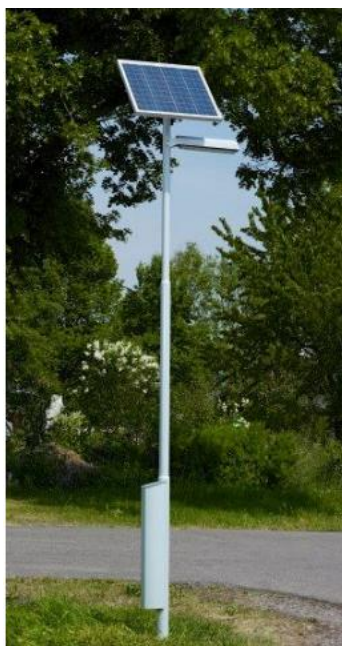


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд світлотехнічної установки з автономним живленням в парковій зоні

Світлодіодне освітлення дозволяє підвищити ефективність ОУ за рахунок економії енергоспоживання, що досягає 80 % по відношенню до світлових приладів, в яких застосовуються традиційні джерела освітлення: лампи розжарювання, ДРЛ, ДНАТ та ін. Перевага світлодіодних ОУ полягає в економічному використанні енергії, а також відсутня інерційність при включенні та вимкненні, що є важливим фактором для освітлювальних установок [13,16].

Блок-схема ОУ з автономним живленням, приведена на рис. 1.7. Залежно від комплектації, ОУ будуть характеризуватися конкретними техніко-економічними показниками і, отже, мати різну ефективність. [13,16].

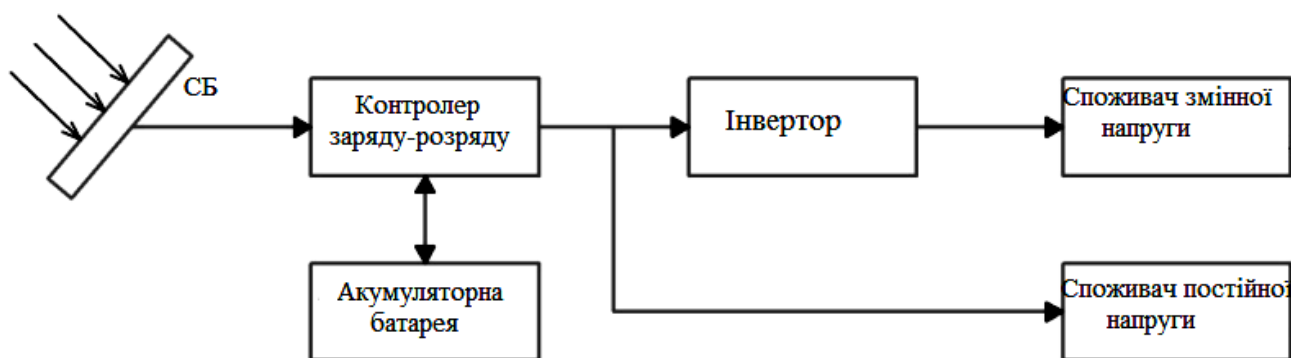


Рис. 1.7. Блок-схема ОУ з автономним живленням

Більшість випадків застосування даного типу побудови ОУ з автономним живленням пов'язаний з невеликим споживанням потужності. Практично такий спосіб отримання енергії може бути застосовний також для польових умов експлуатації ремонтного або будівельного обладнання.

Установка з сонячними батареями дозволяє перетворити сонячне випромінювання в електроенергію, у ролі додаткового джерела енергії може виступати вітрогенератор [13]. Розглянута в роботі [13] гібридна вітро-сонячна система вуличного освітлення передбачає тривалість освітлення в середньому протягом 8-ми годин, яка представлена на рис. 1.8.

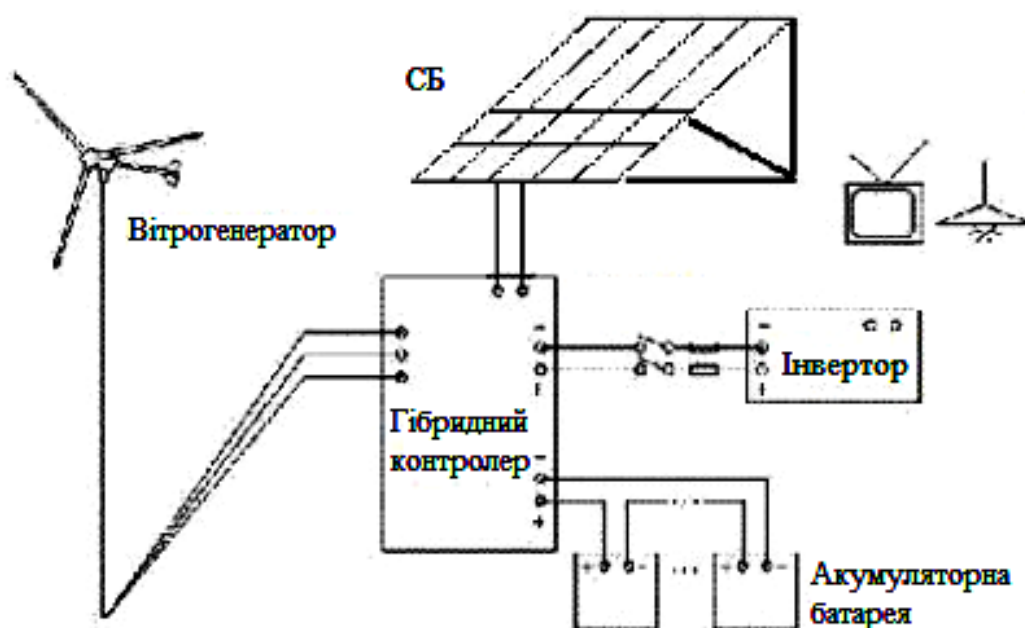


Рис. 1.8. Гібридна вітро-сонячна система вуличного освітлення [13]

Для керування роботою ОУ з автономним живленням у роботі [16] використано контролер заряду/розряду, акумулятор та керуючий блок, які були розташовані на опорі системи освітлення у спеціальному боксі. Блок-схема даної установки приведена на рис.1.9.

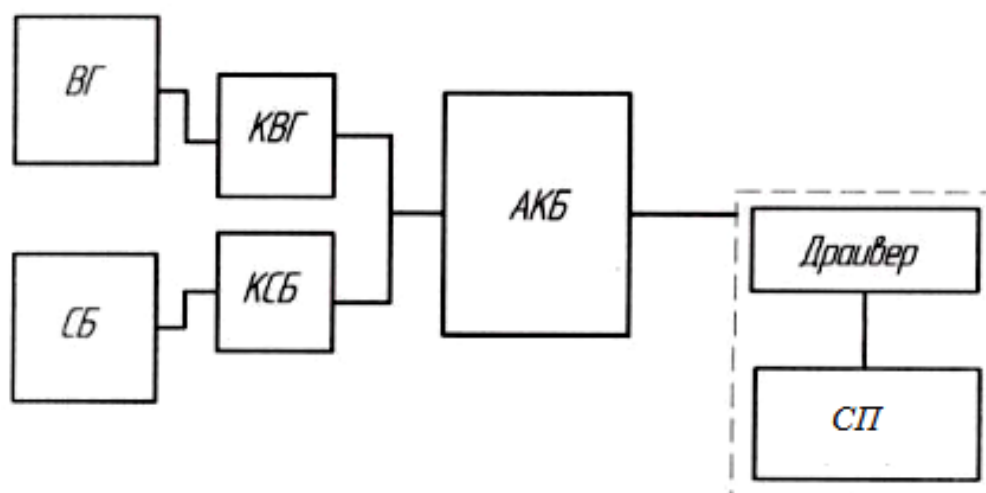


Рис. 1.9. Блок-схема вітро-сонячної система вуличного освітлення з драйвером керування роботи СП [16]: ВГ – вітрогенератор; КВГ – контролер вітрогенератора; КСБ – контролер сонячної батареї



Також у роботі [16] запропоновано використання драйвера СП для економного витрачання електроенергії, який автоматично включає СП при настанні сутінків в черговому режимі. При появі людини в зоні виявлення 10-12 м або автомобіля на відстані 100 м, СП переходить в робочий режим (100 % освітленості). При покиданні людиною зони виявлення СП повертається в черговий режим. Такий алгоритм роботи ОУ дозволяє зменшити споживання струму від акумуляторної батареї.

На рис. 1.10. наведено порівняння умовних активних площ фотоелектричних перетворювачів різних типів, що необхідні для вироблення 1000 Вт електроенергії [1,17-21].

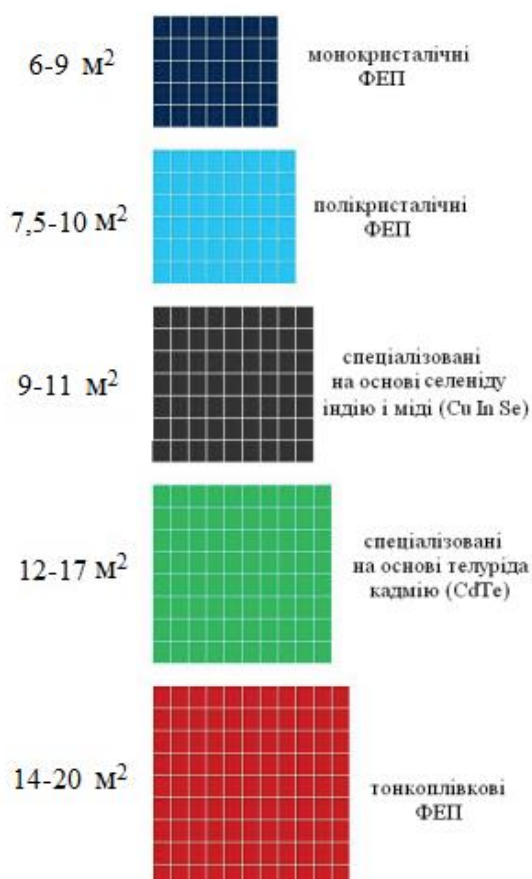


Рис. 1.10. Порівняння площ різних типів ФЕП для отримання 1 кВт електричної енергії: для монокристалічного 6-9 м²; полікристалічного 7,5-10 м²; тонкоплівкового 14-20 м²; концентраторні комірки з коефіцієнтом 0,2-0,4 [1]



Автори у роботах [20-21] показали, що для більшості кристалічних та тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), потрібна значна площа поверхні для отримання однакового значення енергії, через невисокий ККД. Це обмежує їх використання за геометричними розмірами в деяких задачах, в тому числі і у вузлах інформаційних мереж. Для промислового і локального використання найчастіше застосовуються сонячні батареї (СБ) з полікристалічного чи монокристалічного кремнію. Тонкоплівкові батареї в процесі роботи краще сприймають розсіяне випромінювання та мають менші втрати потужності при затемненні окремих областей. Також, вони краще функціонують при вищих робочих температурах, однак, через низький ККД значно поступають кристалічним ФЕП.

Згідно даних, які представлені у роботах [21-24], сонячні ФЕП з аморфного кремнію використовуються рідше за рахунок низьких значень ККД та стабільності параметрів в часі. Проте, тонкоплівкові ФЕП мають перевагу перед кристалічними – меншу у 10-100 разів товщину та використання матеріалів, а також більшу здатність до перетворення дифузного світла у порівнянні із кристалічними ФЕП.

### **1.2.2. Акумуляуючі батареї для освітлювальних установок з автономним живленням**

Електрична енергія, що виробляється сонячними батареями протягом світлового дня, заряджає акумулятор. Різні типи акумуляторів відрізняються за: кількістю циклів перезарядки, терміну зберігання, ємності, розмірами, температурним діапазоном роботи, різним часом заряду, мають різну вартість і т.д.

Автори [25-27] провели аналіз акумуляторних батарей, які накопичують електроенергію від сонячних батарей протягом світлового дня. В цих роботах вказані вимоги, яким повинні відповідати акумуляторні батареї (АКБ) для фотоелектричних перетворювачів:

- низький рівень саморозряду;
- здатність працювати в режимах глибокого розряду;
- робота з малими струмами заряду;
- робота при від'ємних температурах (для систем цілорічного використання);
- мінімальні вимоги по обслуговуванню.

Такими якостями володіють АКБ, які можуть витримувати велике число циклів заряду / розряду. Акумулятори стартерного типу, що призначенні для автомобілів, не годяться для роботи з ФЕП. Найбільшого поширення набули свинцево-кислотні акумулятори, як найбільш дешеві в експлуатації. У них відносна вартість  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ . енергії нижче, ніж в АКБ такої ж ємності, але виготовлених за іншими технологіями. Крім того, АКБ інших типів поступаються свинцево-кислотним акумуляторам за кліматичними характеристиками [25-27].

Свинцево-кислотними називають акумуляторні батареї (СКА), в яких в якості електроліту використовується сірчана кислота, а електроди виготовлені з двоокису свинцю (рис. 1.11). На жаль СКА мають більше недоліків, ніж переваг: вони занадто громіздкі, мають низьку енергоємність, максимум  $40 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$ . До того ж вони характеризуються малою кількістю циклів розряду [25].



Рис. 1.11. Фрагмент підстанцієвої батареї на номінальну напругу 230 В, що складається з 106 послідовно з'єднаних свинцево-кислотних акумуляторів [25]

Автори [25,28] розглядають використання модернізованих свинцево-кислотних акумуляторів, в яких електроліт замінений на скловолокно, що відрізняється здатністю повністю поглинати не тільки весь електроліт, а й виділяються в ході хімічних процесів, газу.

В результаті, акумулятор в розрізі нагадує листкової пиріг, в якому чергуються пластини електродів і шари електроліту, щільно утримувані скловолокном і просочені бульбашками газу (кисню і водню), які беруть активну участь в ході хімічних реакцій відновлення і окислення, роблячи їх більш інтенсивними. Цей процес називається рекомбінацією і в сучасних акумуляторах, виготовлених по AGM технології, він досягає 99 %. Це пояснюється тим, що електроліт не стикається з навколишнім середовищем і не змінює свого хімічного складу, а значить, і властивостей. Все це дозволяє поміщати акумулятор в герметичний корпус, тим самим підвищуючи його безпеку.

Головною перевагою акумуляторів, виготовлених по AGM технології, є його здатність витримувати багато разів глибокі розряди. При цьому, такі розряди проходять для акумулятора практично безслідно. Все це робить їх ідеальними для використання в автономній електричній мережі.

Ще кращими властивостями володіють всі ті ж свинцево-кислотні акумулятори, в електроліт яких додали двоокис кремнію, в результаті чого простір між електродом заповнився своєрідним гелем, наповненим молекулами кисню і водню, які активно беруть участь в процесах окислення і відновлення [28].

Хімічні процеси в таких акумуляторах майже повністю повторюють процеси в батареях, виготовлених за технологією AGM, але гелеві акумулятори ще краще відновлюються зі стану глибокого розряду, мають велику довговічність і ємність. На жаль, вони і ціну мають більш високу.

До недавнього часу найбільш поширеним способом накопичення електричної енергії було застосування свинцево-кислотних акумуляторних

батарей. Вони, наприклад, широко використовуються в системах безперебійного електропостачання малої потужності.

Автори [29,30] пропонують використовувати літій іонні (Li-ion) АКБ, в яких висока реактивність і здатність літію проникати в кристалічну решітку іншого матеріалу, що дозволяє зберегти в атомних зв'язках велику кількість енергії, тому служить ідеальним накопичувачем (рис. 1.12).

Завдяки наноструктурній, топології Li-ion АКБ мають безумовні переваги перед усіма існуючими на сьогоднішній день аналогами по ряду технічних характеристик:

- Струми заряду і розряду набагато вищі. Здатність Li-ion АКБ сприймати великий струм заряду, що дозволяє накопичувати енергію в режимі онлайн. Розряд може трьохкратно перевищувати заряд, що говорить про можливість миттєвої віддачі величезної кількості енергії.
- Дуже низький саморозряд, що не перевищує 2 % від початкового заряду в місяць.
- Відсутній ефект пам'яті (не вимагає повної розрядки перед циклом заряду).



Рис. 1.12. Li-ion акумуляторна батарея [30]

Основними параметрами будь-якої АКБ, є:

- ємність: яку кількість енергії можна запасти в АКБ на 1 кг ваги;
- струм розряду: як швидко накопичену енергію АКБ може віддати;
- ККД: втрати енергії при заряді і розряді;
- кількість циклів розряду і заряду;
- термін придатності - або період експлуатації.

Таблиця 1.7

Основні характеристики акумуляторних батарей [21-26]

Тип	Густина енергії	Потужність	Ефективність	Кількість циклів	Робоча температура
	<i>Вт·год/кг</i>	<i>Вт/кг</i>	%		°C
Кислотно-свинцевий	30-40	180	70-92	500-800	-20...+60
Li-ion	160	1800	99,9	1200	- 20...60
LiFePO <sub>4</sub>	80-120	1400	99,9	<2000	- 45...80
Суперконденсатори	<10	>10000	0,9-0,98	>1000000	-40...+70

Як видно з табл. 1.7, Li-ion АКБ мають значні переваги перед свинцевими АКБ. Це визвано в першу чергу тим, що у них різний принцип дії. У свинцевих АКБ електроди вступають в хімічну реакцію з електролітом - сірчаною кислотою, за рахунок чого відбувається накопичення електроенергії. Але з часом кислота утворює на поверхні електродів сульфат свинцю, що приводить батарею в непридатність. Передчасне старіння свинцевих АКБ відбувається так само при розряді великими струмами і паралельному підключенні, яке часто використовується для збільшення сумарної ємності.

У Li-ion як такої хімічної реакції не відбувається, а відбувається міграція іонів літію з електрода на електрод, накопичуючи або віддаючи заряд, за рахунок чого Li-ion АКБ мають значно кращі характеристики.

В той же час розвиток енергоємних технологій вимагає розробляти і вдосконалювати накопичувальні пристрої, які можуть не тільки накопичувати велику енергію, але й швидко віддавати її в навантаження [31-38, 41-44] та витримувати велику кількість заряд - розрядних циклів без погіршення енергетичних характеристик [41]. На даний час за вказаними показниками звертають на себе такі нелінійні ємнісні накопичувачі електроенергії, як суперконденсатори (СК) (відомі також, як іоністори, ультраконденсатори та двошарові електрохімічні конденсатори) [44-49]. Ці нелінійні накопичувальні елементи займають проміжну область між акумуляторами і лінійними конденсаторами [47]. Сучасні суперконденсатори витримують більше мільйона зарядно-розрядних циклів без руйнування внутрішньої структури, що в 500 разів більше, ніж літій-іонні акумулятори [46]. Завдяки тому, що в 10-30 разів меншому, ніж в акумуляторах, внутрішньому електричному опорі (і відповідно менших втратах на ньому електроенергії) суперконденсатори можуть реалізувати в навантаженні в 10-30 разів більші потужності та струми [33, 37]. Ємність батарей сучасних СК може складати до 10000  $\Phi$ , при номінальній напрузі 2,7-4 В [41]. Для використання суперконденсаторів на більш високі напруги їх з'єднують послідовно і отримують батареї СК на сотні вольт [38-41].

Порівняно з акумуляторами та звичайними лінійними конденсаторами СК мають значно вищі електродинамічні характеристики завдяки залежності їхньої ємності від напруги [36-41, 46]. Експериментальні вимірювання при заряді суперконденсаторів ємністю 470, 1500 і 2600  $\Phi$  від джерела постійної напруги, проведені в роботах [38-41, 47, 49], підтвердили, що під час заряду суперконденсатора його загальна ємність збільшується практично прямо пропорційно зростанню напруги на його клеммах, а при розряді його ємність відповідно зменшується. Така залежність ємності суперконденсатора від напруги

на його клемі пояснюється тим, що вона складається з послідовно з'єднаних багатьох ємностей, які зумовлені подвійним електричним шаром зарядів на поверхні пор активованого вугілля основних електродів СК. Тому із зростанням напруги збільшується діелектрична проникність електроліту та зменшується товщина подвійного електричного шару суперконденсатора, що призводить до майже лінійного збільшення його загальної ємності та нелінійного збільшення заряду [31, 33, 47].

У роботі [47] СК заряджали від джерела постійної напруги, спостерігаючи зростання його ємності під час збільшення напруги на його клемі. З урахуванням отриманої залежності, загальну ємність суперконденсатора було апроксимовано сумою незмінної ємності  $C_1 = \text{const}$  і диференційної ємності  $C_d(U) = kU$ , яка змінюється пропорційно зміненню напруги  $U$  на клемі СК. Коефіцієнт пропорційності  $k = \text{const}$  по суті є частковою похідною ємності СК по напрузі  $U$  та має розмірність  $\Phi/V$ . Таким чином, згідно з фізикою подвійного електричного шару автори пропонують загальну ємність суперконденсаторів  $C(U)$  визначати виразом [31-44]:

$$C(U) = C_1 + kU. \quad (1.1)$$

При моделюванні режимів роботи СК, автори [31–44] застосовують розгалужені схеми заміщення. З метою врахування розподілених електричних параметрів суперконденсаторів пропонувались їхні розгалужені електричні схеми заміщення з різною кількістю паралельних гілок, що містять зосереджені лінійні та нелінійні елементи  $C$ ,  $R$  і  $L$  [44-49]. Кількість гілок визначалася необхідністю відобразити зарядні та розрядні перехідні процеси різної тривалості. Лише в першій гілці (гілці швидкого розряду) схеми заміщення СК вводять лінійну і нелінійну ємності (відповідно  $C_1 = \text{const}$  і  $C_{1d} = k_1 U$ ) зі спільним внутрішнім активним опором  $R_1$ , через який ці ємності  $C_1$  і  $C_{1d}$  можуть заряджатись і розряджатись за одиниці-десятки секунд. Інші гілки теж мають лінійні і нелінійні

ємності, але їх активні опори настільки великі, а перехідні процеси тривалі, що нелінійні ємності не ураховують [37-41]. Вважають, що друга гілка (яку називають гілкою з затримкою) має незмінні параметрами  $C_2$  і  $R_2$  і характеризує перехідні зарядні та розрядні процеси, які закінчуються в хвилинному діапазоні. Третя (довготривала) гілка має незмінні параметрами  $C_2$  і  $R_2$  та сталу часу, яка є більшою, від 10 хвилин. У більшості досліджень в електричній схемі заміщення СК беруть саме три гілки. Інколи беруть навіть дві гілки [32], але таке спрощення електричної схеми заміщення дозволяє аналізувати лише швидкі перехідні процеси, оскільки при тривалості процесів більше 10 хвилин дає велику похибку (30-60 %). Деякі дослідники пропонують схему заміщення з 10 гілками [49], але вона є досить складною для виконання швидких енергетичних розрахунків. Для врахування процесів саморозряду суперконденсаторів у їхні схеми заміщення вводять додатковий активний резистор  $R_{cp}$ .

Зважаючи на наявність в електричних схемах заміщення СК декількох гілок з різними параметрами слід чекати, що при швидкому заряді суперконденсаторів і подальшому їх розряді, напруга на їх клеммах повинна швидко зменшуватись на певну величину, а потім вже зменшуватись більш повільно, але швидше, ніж за рахунок процесів саморозряду суперконденсаторів. При більш тривалому заряді СК процес зменшення його напруги повинен бути більш повільним. Але ці процеси не були вивчені до кінця і потребують більш глибокого дослідження.

### **1.2.3. Контролери заряду акумуляторних батарей**

Систематичний перезаряд призводить до кипіння електроліту і здуванню герметичних АКБ. Глибокий же розряд небезпечний для акумуляторів тим, що веде до сульфітації пластин і загибелі АКБ. Особливо чутливі до перезаряду і перерозряду свинцево-кислотні акумулятори найбільш часто застосовуються в фотоелектричних системах. Тому, в таких системах необхідно використовувати контролер заряду акумулятора від сонячної батареї [50]. Він виступає своєрідною



сполучною ланкою між сонячною батареєю і акумуляторною батареєю. До його основних функціональних обов'язків входить:

- автоматичне підключення сонячної батареї на заряд АКБ;
- багатостадійний заряд акумуляторної батареї;
- автоматичне відключення сонячної батареї при повному заряді АКБ;
- автоматичне відключення навантаження при встановленому рівні розряду АКБ.

На даний час найбільш популярні контролери двох типів:

- з ШІМ (PWM) – широтно-імпульсна модуляція (Pulse- width modulation);
- з MPPT – пошук точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking).

Контролер з ШІМ (рис. 1.13) дозволяє досягати 100 % рівень зарядки акумулятора. Відбувається це в 4 стадії, які виконуються автоматично в залежності від фактичного рівня заряду АКБ (рис. 1.14) [51-55]:

1) стадія Основний заряд / Накопичення / Bulk. Коли АКБ отримує повністю весь струм сонячної батареї;

2) стадія Поглинаючий заряд / Absorbtion/ШІМ заряд. Коли напруга на АКБ досягає певного рівня, контролер починає підтримувати постійну напругу за рахунок ШІМ струму заряду. Це дозволяє уникнути перегріву і газоутворення в акумуляторі. Струм зменшується в міру заряду АКБ;

3) стадія Підтримуючий заряд / Рівновага / Float. Коли АКБ повністю заряджена, напруга зменшується для запобігання подальшого нагріву або газоутворення в батареї. АКБ підтримується в зарядженому стані;

4) стадія Врівноважуючий заряд (equalization). Тільки для АКБ відкритого типу. Багато батарей з рідким електролітом покращують свою роботу при періодичному заряді, при цьому вирівнюються напруги на різних банках АКБ і відбувається очищення пластин і перемішування електроліту. Процес стадії вирівнювання супроводжується великим газовиділенням – утворюються

газоподібний водень і кисень. Щоб уникнути вибуху необхідно передбачити достатню вентиляцію і усунути всі джерела запалювання.



Рис. 1.13. Контролер з широтно-імпульсною модуляцією  
JUTA 30A 12/24V [52]

ШІМ – контролери зазвичай застосовуються в невеликих системах від 100 Вт до 2 кВт, де потрібна зарядка акумуляторів невеликої ємності і встановлено невелику кількість сонячних батарей. Деякі з них мають як світлодіодну індикацію, так і LCD-екран, на які виводиться вся поточна інформація про роботу системи[46-49].

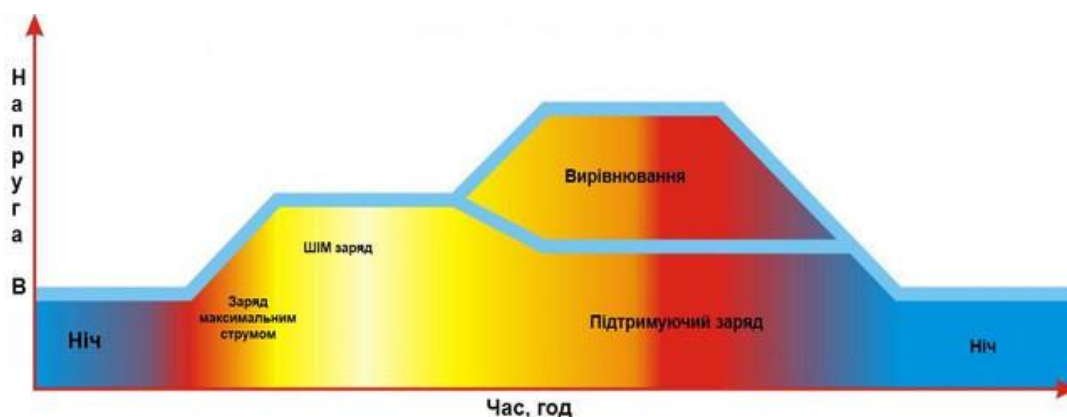


Рис. 1.14. Алгоритм роботи ШІМ-контролера [51-55]

MPPT – контролери наділені важливою функціональною особливістю – пошук точки максимальної потужності. Електрична енергія, яка виробляється СБ,

повинна максимально застосовуватися в навантаженні – один з головних принципів контролера даного виду (рис. 1.15).



Рис. 1.15. MPPT – контролери, Maximum Power Point Tracking [55]

Щоб мати чітке уявлення про роботу MPPT контролерів, для початку потрібно розібратися, що таке точка максимальної потужності. У даній точці значення напруги, а також сила струму, визначаються кількома аспектами, головними з яких є яскравість світла, нагрівання батареї і кут падіння променів. Оскільки ці величини непостійні, точка максимальної потужності теж буде змінювати свій стан. І щоб обладнання працювало найбільш ефективно і передавало якомога більше електроенергії від сонця, потрібний акумулятор.

### Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз систем зовнішнього освітлення населених пунктів по областях України.
2. Проведено аналіз будови освітлювальної установки з автономним живленням для зовнішнього освітлення. Розглянуто ефективність ФЕП. Представлено акумулюючі пристрої для систем автономного живлення та контролери заряду/розряду для різних типів акумуляторів.
3. Розглянуто автономні фотоелектричні освітлювальні установки, які присутні на ринку в даний час: Shenzhen Shinehui Technology Co., Sun Shines, та Towersun-128, EPS-soltec.

## **РОЗДІЛ 2. ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ЯК ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ОУ**

### **2.1. Вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних батарей**

Для пошуку енергоефективного режиму роботи фотоелектричного перетворювача (ФЕП), або сонячної батареї (СБ) в умовах зміни світлового потоку, температури, електричних параметрів навантаження необхідно провести вимірювання та моделювання їх вольт-амперних характеристик (ВАХ).

Вимірювання ВАХ дає можливість розрахувати максимальну потужність та ККД СБ, а також дозволяє здійснювати контроль дефектів на початковій стадії їх використання та прогнозувати деградацію сонячних елементів (СЕ). На основі ВАХ можна також проводити корекцію навантаження для максимального відбору потужності.

Основні методи вимірювання ВАХ поділяють на два класи [56-59]:

- статичні або безперервні методи (static measurements, DC measurements);
- динамічні або імпульсні методи (dynamic IV measurements, pulsed IV measurements).

В залежності від стану СЕ під час вимірювань ВАХ виділяють ізотермічні та ізодинамічні методи [60]. Ізотермічними називають вимірювання, при яких температура СЕ підтримується на одному рівні, що сприяє зменшенню теплових спотворень ВАХ і може істотно збільшити точність результатів.

Ізодинамічне вимірювання проводяться таким чином, щоб заряд, обумовлений ефектом захоплення носіїв на паразитних енергетичних рівнях напівпровідника, в процесі вимірювання ВАХ залишався незмінним. Основна мета ізодинамічних вимірювань - підвищення точності вимірювання ВАХ шляхом запобігання або стабілізації ефекту захоплення носіїв [61-63].

Для вимірювання ВАХ був використаний статичний ізотермічний метод.

Для цього був змонтований лабораторний стенд, до складу якого входять: імітатор сонячного випромінювання, вольтметр В7-16, амперметр Э 525 та магазин опорів. Зовнішній вигляд його показаний на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Установка для вимірювання ВАХ СБ

В якості імітатора використовували газорозрядні лампи ДКСШ-150 та ДРИ-1000. Спектральний склад випромінювання лампи з ксеноновим наповненням та спектр сонячного випромінювання приведені на рис. 2.2 [64,65]. З рис. 2.1 видно, що ці спектри є дуже близькими у видимій області.

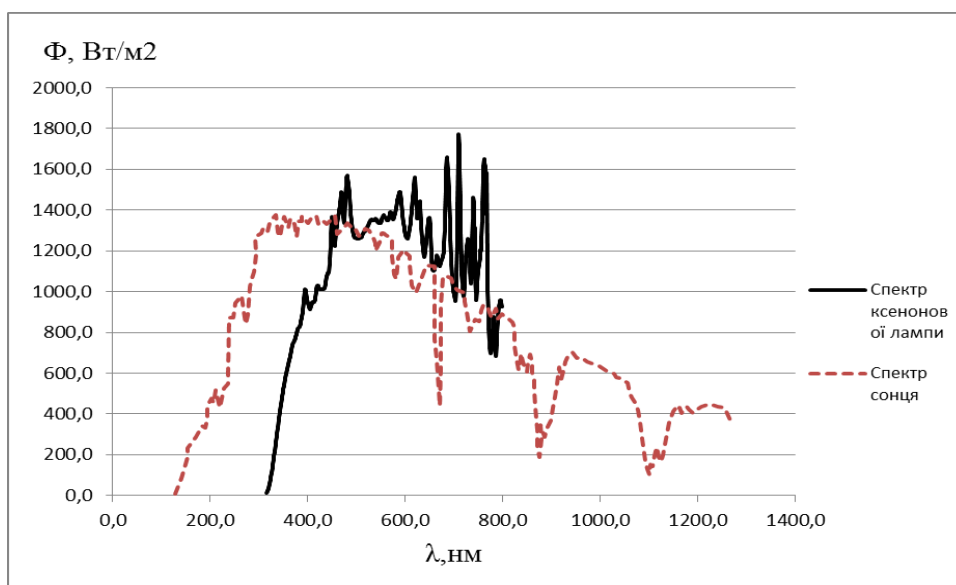


Рис. 2.2. Спектральний розподіл випромінювання сонця і ксенонової лампи

Були проведені вимірювання як світлових так і темнових ВАХ сонячної батареї типу АЛМ-50М.

Світловий потік, який попадав на СБ, вимірювався приладом Solar Power Meter СЕМ DT-1307 похибка, якого не перевищує 5 %. Зміну густини світлового потоку здійснювали шляхом зміни відстані між СП і СБ. Це забезпечувало зміну густини потоку в межах від 200 до 1000  $Вт/м^2$  [66]. Температура СБ підтримувалася на однаковому рівні, в межах 25 °С. Зміну струму в колі навантаження та напруги на СБ здійснювали шляхом зміни опору навантаження  $R_n$ , в якості якого було використано магазин опорів МСР.

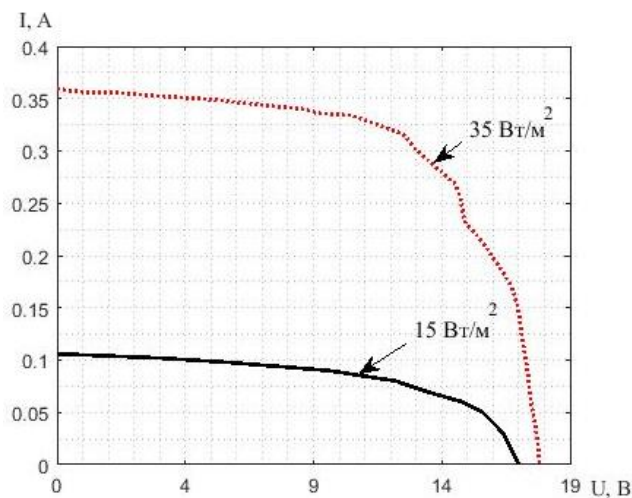
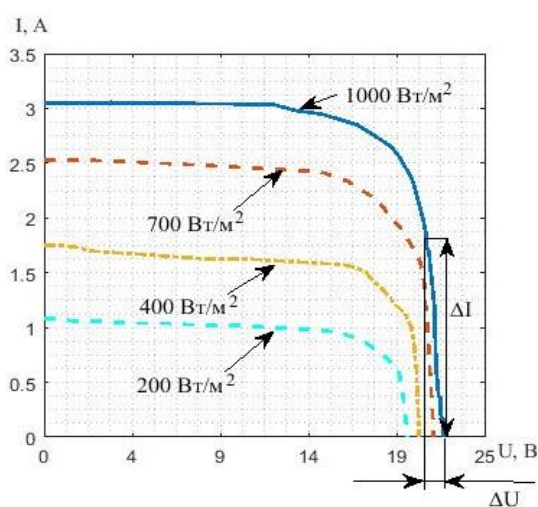
Для дослідження фотоелектричних параметрів сонячної батареї в умовах низького рівня опромінення 15...35  $Вт/м^2$ , що доволі часто спостерігається в умовах підвищеної хмарності, було використано світловий прилад FYGT300-I R7S з лампою ДКСШ-150. Зображення даної установки приведено на рис. 2.3. На рис. 2.4 приведені світлові ВАХ сонячної батареї АЛМ-50М, а на рис. 2.5 представлено графіки зміни споживаної потужності, які були зняті при густині потоку випромінювання 1000, 700, 400, 200, 35 і 15  $Вт/м^2$ .



Рис. 2.3. Установка для вимірювання ВАХ СБ з лампою ДКСШ-150



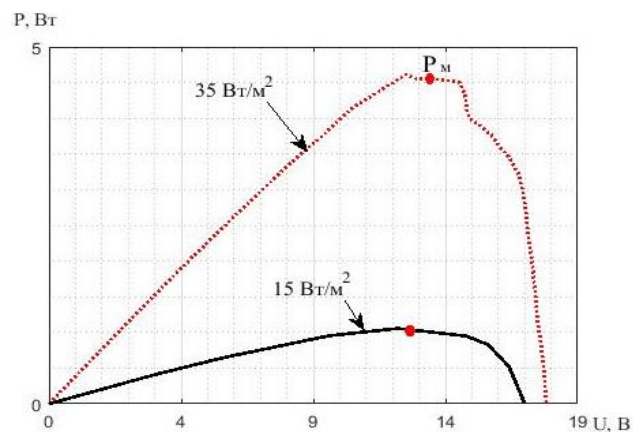
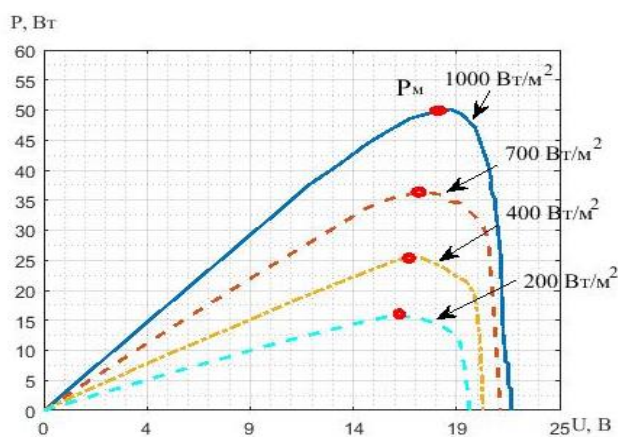
На світлових ВАХ при густині потоку випромінювання 1000, 700, 400, 200,  $\text{Вт/м}^2$  при зміні напруги від 0 до 15 В струм СБ змінюється дуже мало. Різкий спад фотоструму відбувається на ділянці 19-22 В. По цьому спаду було визначено величину послідовного опору  $R_n$  в еквівалентній схемі сонячної батареї (рис. 2.7). При густині потоку випромінювання 35 і 15  $\text{Вт/м}^2$  така ж ділянка з малим кутом нахилу до осі напруги присутня до напруги 12 В. При вищій напрузі відбувається різкий спад фотоструму.



а)

б)

Рис. 2.4. Світлові ВАХ сонячної батареї АЛМ-50М при густині потоку опромінення  $\text{Вт/м}^2$ : а) 1000, 700, 400, 200; б) 35, 15



а)

б)

Рис. 2.5. Графіки зміни потужності сонячної батареї АЛМ-50М при густині потоку опромінення  $\text{Вт/м}^2$ : а) 1000, 700, 400, 200; б) 35, 15

З даних графіків були визначені  $U_m$ ,  $I_m$ , при яких відбувається максимальне значення споживаної потужності, а також напругу холостого ходу  $U_{x.x}$  і струм короткого замикання  $I_{к.з}$ . Ці параметри приведені в табл. 2.1. Крім того, для сонячних батарей вводиться ще один параметр, який називається коефіцієнт заповнення і позначається  $FF$  і визначається з рівняння  $FF = U_m \cdot I_m / U_{x.x} \cdot I_{к.з}$ . Для даного типу батареї даний параметр лежить в межах 0,44-0,75, що є дещо заниженим для монокристалічних кремнієвих батарей.

Таблиця 2.1

## Електротехнічні характеристики сонячної батареї АЛМ-50М

	1000 $Вт/м^2$	700 $Вт/м^2$	400 $Вт/м^2$	200 $Вт/м^2$	35 $Вт/м^2$	15 $Вт/м^2$
$R_n, Ом$	0,48	0,49	0,5	0,8	6,6	20
$U_{x.x}, В$	21,6	21,1	20,3	19,6	17,8	16,9
$I_{к.з}, А$	3,05	2,52	1,76	1,1	0,36	0,11
$U_m, В$	17,5	17,4	16,9	16,6	16,2	16,1
$I_m, А$	2,84	2,2	1,52	0,9	0,2	0,05
$P_m, Вт$	50	38	25	15	3	1
$FF$	0,75	0,72	0,72	0,69	0,5	0,44

Вимірювання темнових ВАХ СБ проводили в темній кімнаті. Для вимірювання струму через СБ використовували мікроамперметр М 1109, а джерелом живлення в даній установці було регульоване джерело напруги типу LW-K3010D, яке забезпечувало дискретність напруги 0,1 В [67]. Вимірювання темнових ВАХ було проведено на сонячних елементах батареї АЛМ-50М.

На рис. 2.6 приведена зворотня вітка темної ВАХ сонячної батареї АЛМ-50М. Із даної характеристики було визначено шунтуючий опір  $R_w = 8,3 кОм$ . По відрізку, що відтинає графік на осі струму, визначили зворотній струм насичення  $I_0 = 4 мкА$ . Дані параметри були використані при моделюванні СБ.



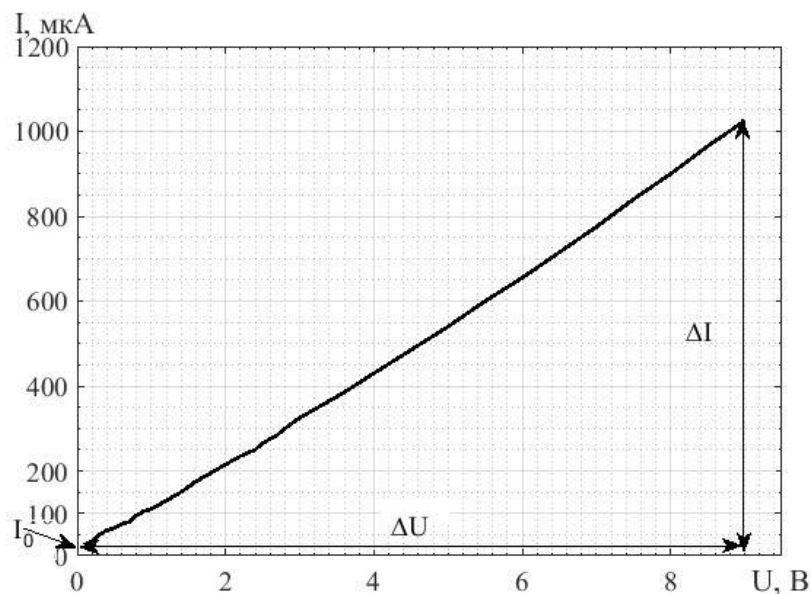


Рис. 2.6. Зворотня вітка темної ВАХ сонячної батареї АЛМ-50М

## 2.2. Побудова моделі фотоелектричного перетворювача

Для побудови моделі ФЕП була використана електрична схема, яка отримала назву «модель одного діода» [68-79]. Основними елементами схеми (рис. 2.7) є: джерело струму, діод, паралельний і послідовний опір. Джерело струму моделює процес виникнення в елементі фотоструму  $I_{\phi}$  під дією освітлення. Діод включений в прямому напрямку паралельно до джерела струму. Під дією прямого зміщення через наявність надлишкових концентрацій електронів в  $n$  - області елемента і надлишкової концентрації дірок в його  $p$  - області через діод протікає деякий струм  $I_0$ . Шунтуючий опір фотоелемента  $R_{ш}$ , виникає за рахунок наявності зворотнього опору  $n$ - $p$  переходу і різних провідних плівок або забруднень на поверхні елемента, він також підключений паралельно джерелу струму. Послідовний опір  $R_n$  – опір самого напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений фотоелемент.

Еквівалентна схема сонячного елемента приведена на рис. 2.7 [68,80,81].

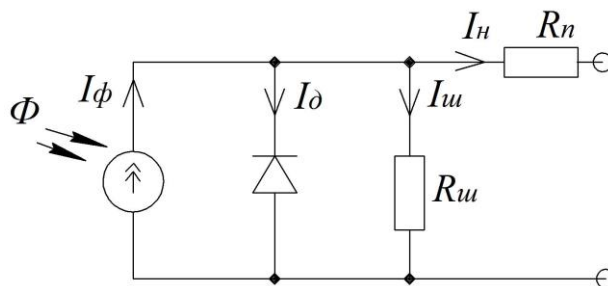


Рис. 2.7. Еквівалентна схема елемента сонячної батареї

Виходячи із того, що струм через діод описується рівнянням

$$I_{\delta} = I_0 \left( \exp \frac{eU}{AkT} - 1 \right) \text{ та згідно першого закону Кірхгофа струм навантаження ФЕП}$$

можна записати

$$I_n = I_{\phi} - I_0 \left( \exp \frac{eU}{AkT} - 1 \right) - \frac{U + I_n R_n}{R_{ш}}, \quad (2.1)$$

де  $U$  – прикладена напруга;

$I_0$  – струм насичення діода;

$I_{\phi}$  – фотострум;

$e$  – заряд електрона;

$A$  – коефіцієнт ідеальності діода ( $1 \leq A \leq 2$ );

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура.

Формула (2.1) є найбільш точною для інженерних розрахунків.

На основі отриманих ВАХ були розраховані значення опорів  $R_{ш}$  і  $R_n$ , які дорівнюють 8,3 кОм та 0,48 Ом відповідно і після підставлення в формулу (2.1) дозволили спростити її до вигляду:

$$I_n = I_{\phi} - I_0 \left( \exp \frac{eU}{AkT} - 1 \right). \quad (2.2)$$

Також були використані значення  $U_{xx}$  та  $I_{к.з.}$ , які були отримані на основі рівняння (2.2)

$$I_{к.з.} = I_{\phi}, \quad (2.3)$$

$$U_{xx} = \frac{AkT}{e} \ln \left( \frac{I_{к.з.}}{I_0} + 1 \right). \quad (2.4)$$

В результаті модель сонячної батареї АЛМ-50М була представлена електричною схемою рис. 2.8 з відповідними номінальними значеннями елементів.

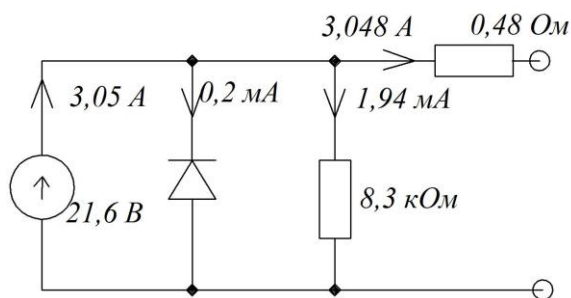


Рис. 2.8. Електрична схема СБ типу АЛМ-50М

При використанні сонячних батарей в якості автономних джерел живлення як світлотехнічних систем, так і інших споживачів, постає завдання розрахунку умов передачі електроенергії до споживача. Умовою передачі до навантаження максимальної потужності є умова, коли  $R_{н} = R_{вн}$ . З отриманих значень шунтуючого опору та опору діода було розраховано  $R_{вн}$ , що дорівнювало 7,7 кОм.

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , який визначається відношенням корисної потужності, або потужності що виділяється в навантаженні до потужності батареї і дорівнює:

$$\eta = \frac{P}{P_{повн}} = \frac{R_H}{R_H + R_{вн}}. \quad (2.5)$$

У випадку використання централізованих автономних ФЕП, від яких необхідно передавати електроенергію по лінії електропередачі і до споживача, у формулу (2.5) потрібно додати опір лінії  $R_L$ .

$$\eta = \frac{P}{P_{повн}} = \frac{R_H + R_L}{R_H + R_{вн} + R_L}. \quad (2.6)$$

Як видно з рівняння (2.2 і 2.4), коефіцієнт ідеальності діода  $A$  (quality factor of diode) має вплив на  $U_{xx}$ . Тому важливо враховувати його значення, при моделюванні. Зменшення значення коефіцієнта ідеальності діода значно впливає на напругу сонячної батареї. При різних значеннях коефіцієнта ідеальності діода спостерігається відхилення напруги від паспортних даних рис. 2.9.

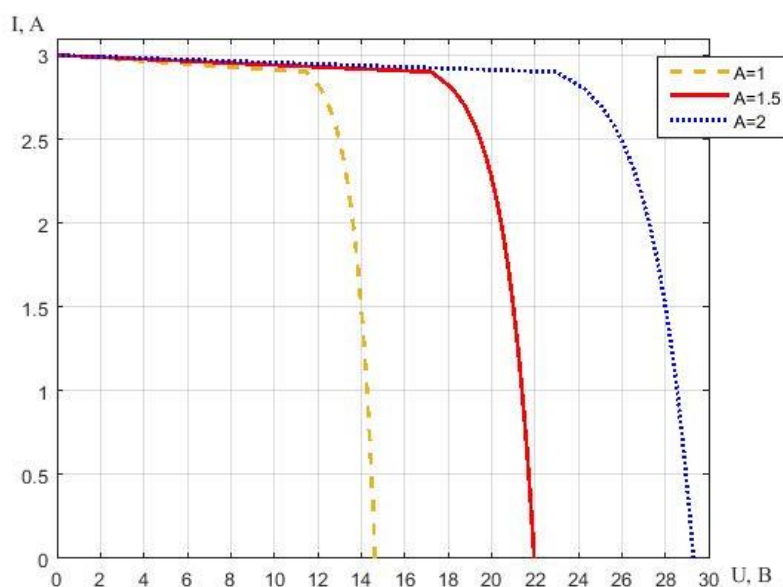


Рис. 2.9. Вплив коефіцієнта ідеальності діода на ВАХ

Зміна зворотнього струму насичення діода також значно впливає на  $U_{xx}$ . Можливі випадки, коли в одній партії сонячних батарей струм насичення діода не збігається. Даний випадок був промодельований і представлений на рис. 2.10.

При збільшенні струмів насичення діода від  $I_0=4 \text{ мкА}$  до  $I_0=40 \text{ мкА}$  відбувається зменшення  $U_{xx}$  від 21,6 до 19 В, що в свою чергу знижує вихідну потужність.

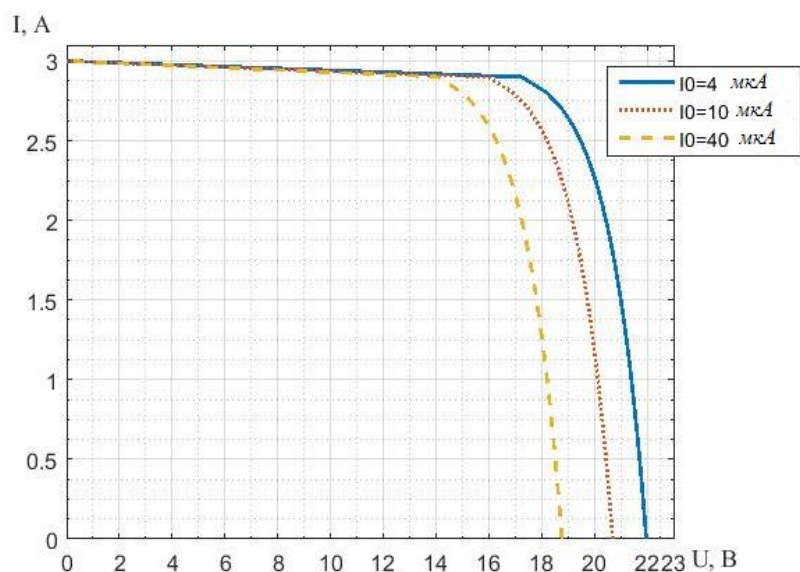


Рис. 2.10. Вплив струму насичення діода на ВАХ

### 2.3. Блок накопичення електричної енергії

Для автономного живлення ОУ від ФЕП в темнову пору доби необхідно використовувати накопичувачі електричної енергії [21-25]. На сьогодні інтенсивно впроваджуються Li-іон акумуляюючі батареї, які мають більш широкий температурний діапазон експлуатації та менший саморозряд, ніж кислотні та лужні акумулятори [35, 36, 38-41]. Паралельно з впровадженням Li-іон акумуляюючих батарей на теперішній час широко проводяться роботи по дослідженню нових способів акумуляування електричної енергії. Серед таких накопичувачів електроенергії є суперконденсатори (СК) або іоністори. У них відсутні які-небудь хімічні реакції, крім того, накопичення енергії відбувається

за час від мілісекунд до хвилин, залежно від їх ємності. Вони витримують більше мільйона зарядно-розрядних циклів без руйнування внутрішньої структури, що в 500 разів більше, ніж літій-іонні акумулятори. Для використання СК в блоках автономного живлення ОУ, було проведено дослідження їх електрофізичних характеристик. Для цього була розроблена та змонтована експериментальна установка, блок-схема якої показана на рис. 2.11 [82].

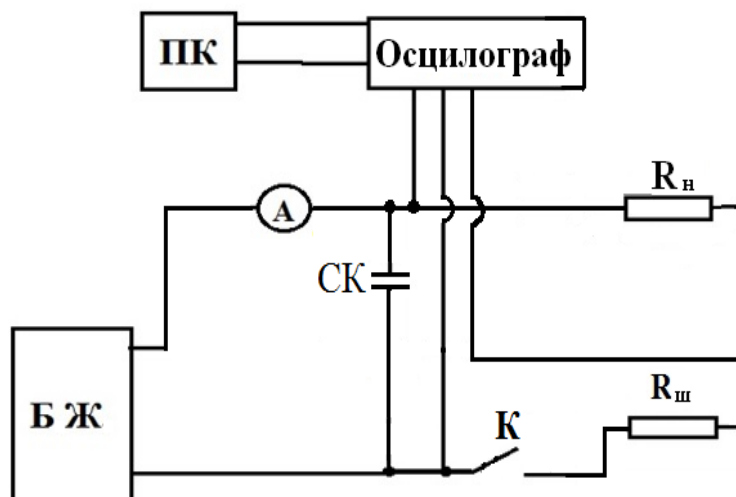


Рис. 2.11. Блок-схема входного контролю параметрів суперконденсаторів

Заряд СК здійснювали постійним струмом від блоку живлення БЖ типу LW-K3010D. Розряджали СК на  $R_n + R_{ш}$ , які мали низький температурний коефіцієнт і клас точності 0,02. Струм розряду контролювали за спадом напруги на  $R_{ш}$ . Для аналізу процесів заряду та розряду СК використовували осцилограф INSTRUSTAR ISDS205C. Отримані дані записували на персональний комп'ютер ПК. В експериментах використано суперконденсатори типу Green-cap фірми Samvha [42].

При експериментальних дослідженнях використано метод циклування (заряд/розряд) [39-41]. Це дозволило усунути вплив ефекту перерозподілу заряду на параметри ємності [39] та утримувати температуру СК у рамках похибки, що не перевищувала 1 °C. Останнє обумовлено тим, що під час заряду (розряду) на внутрішньому опорі СК виділяється тепло, для дисипації якого потрібен час. На

першому етапі суперконденсатор заряджали до потенціалу  $U$ . На другому етапі СК витримували при постійній напрузі і на третьому етапі проводили розряд на постійний опір. Залежність напруги від часу на клеммах суперконденсатора приведено на рис. 2.12, а залежність струму розряду СК приведено на рис. 2.13.

На графіку рис. 2.12 можна виділити чотири ділянки: 1 – заряд СК; 2 – режим витримування СК під напругою; 3 – різкий спад напруги на клеммах СК; 4 – плавний розряд СК. За спадом напруги на ділянці 4 визначали ємність СК за формулою [83-85].

$$C = -\frac{\Delta t}{R_n} \cdot \left( \ln \frac{U_2}{U_1} \right), \quad (2.7)$$

де  $\Delta t$  – тривалість розряду СК;

$U_2/U_1$  – відношення кінцевої напруги на клеммах СК до початкової.

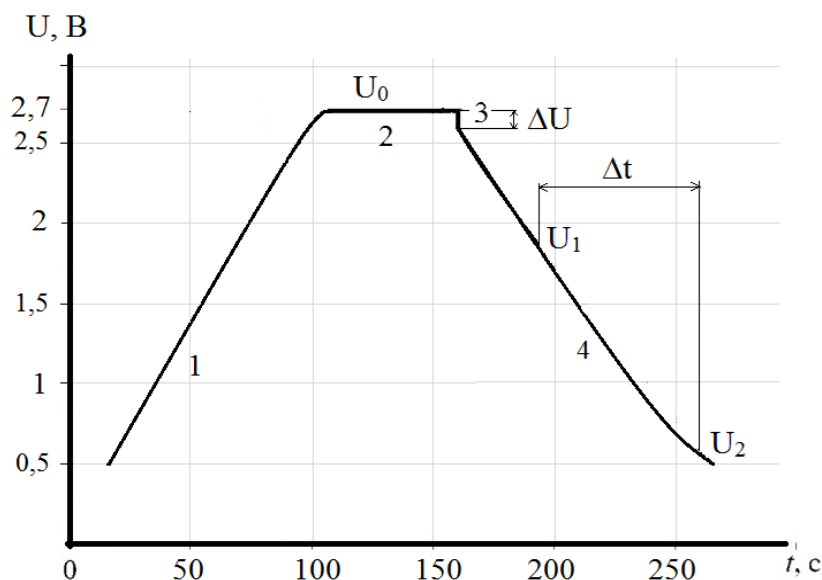


Рис. 2.12. Залежність напруги від часу на клеммах суперконденсатори

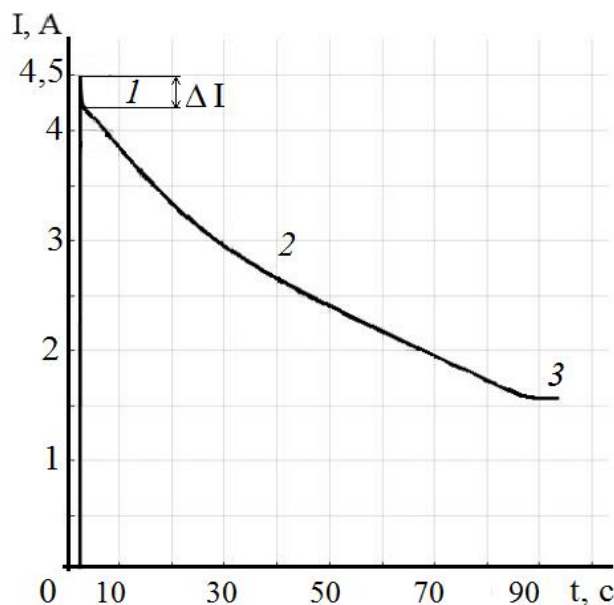


Рис. 2.13. Залежність розрядного струму суперконденсатори від часу

Зважаючи на те, що індуктивність розрядного контура СК (рис. 2.11) є незначною і практично не впливає на швидкість наростання струму розряду, а комутатор  $K$  можна вважати ідеальним (тобто його комутація відбувається миттєво і статичні та динамічні втрати електроенергії в ньому відсутні), тому при замиканні  $K$  струм розряду СК на  $R_n$  зростає практично миттєво від нуля до 4,5 А, після чого він повільно спадає з різними сталими часу.

Так на ділянці 1 (ділянці швидкого розряду СК на рис. 2.13) відбувається спад струму приблизно на 0,3 А протягом 0,5 мс. Це пояснюється швидким використанням електроенергії поверхневого шару електродів СК. Більш повільний (протягом  $\approx 84$  с) спад струму, приблизно на 2,6 А, відбувався на ділянці 2, що зумовлено використанням енергії більш глибокого шару електродів СК. Тривалість процесів розряду СК, яка представлена на рис. 2.13. третьою ділянкою складала більше 300 с. Розраховуючи відношення  $\Delta U$  та  $\Delta I$  на кожній з ділянок 1-3 рис. 2.12. та рис. 2.13. було визначено зміну внутрішнього опору досліджуваного СК.

В табл. 2.2. наведено усереднені значення ємності та внутрішнього опору окремого суперконденсатора Green-cap з номінальною напругою заряду 2,7 В та



батареї з п'яти послідовно з'єднаних СК, із зарядною напругою 13,5 В. Для визначення параметрів окремо взятого елемента використовували вибірку із 10 суперконденсаторів, в результаті розкид отриманих даних не перевищувало 5 %.

Було виявлено, що ємність СК залежить від напруги зарядження, так при напрузі зарядження  $U_0 = 2,7 \text{ В}$  його ємність дорівнювала 152  $\Phi$ , а при 2,5 В – 143  $\Phi$ , при 2,3 В – 134  $\Phi$  (табл. 2.2). При заряді батареї із 5 суперконденсаторів Green-cap напругою 13,5 В; 12,5 В і 11,5 В їхня ємність зменшувалась від 31  $\Phi$  до 30  $\Phi$  і далі до 29  $\Phi$  відповідно. При цьому внутрішні опори СК Green-cap 2,7 В (рівний  $11 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ) та Green-cap 13,5 В (рівний  $55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ) залишались практично незмінними. Такий процес збільшення ємності при збільшенні напруги зарядження на клеммах суперконденсаторів пояснюється проникненням зарядів у більш глибокі пори його електродного матеріалу, що зумовлює збільшення ємності СК. [84]

Таблиця 2.2.

Усереднені значення ємності та внутрішнього опору суперконденсатора

№	$U_0, \text{ В}$	Green-cap 2,7 В	$U_0, \text{ В}$	Green-cap 13,5 В
1	2,7	152, $\Phi$	13,5	31, $\Phi$
2	2,5	143, $\Phi$	12,5	30, $\Phi$
3	2,3	134, $\Phi$	11,5	29, $\Phi$

Для обробки експериментальних результатів та розрахунку внутрішнього опору і ємності було розроблено програмне забезпечення в пакеті MATLAB.

Поряд з великими перевагами суперконденсаторів слід враховувати, що в них, як і в будь яких ємнісних накопичувачах електроенергії виникає процес саморозряду, який описується експотенціальною залежністю:

$$U = U_0 e^{-t/\tau},$$

де  $\tau$  – стала процесу саморозряду СК.

Для дослідження процесів саморозряду суперконденсатора їх заряджали до максимальної напруги  $U_0 = 2,7 \text{ В}$  і витримували при цій напрузі від 300 с до 21600 с. Після цього відключали СК від зарядного пристрою і залишали без навантаження, вимірюючи кожні 300 с зміну напруги між клемми суперконденсатора.

Залежність падіння напруги на клеммах суперконденсатора від часу його витримки у відключеному стані наведено на рис. 2.14. Крива 1 на цьому рисунку відповідає витримці суперконденсатора 300 с., крива 2 – 3600 с., 3 – 7200 с., 4 – 14400 с., і 5 – 21600 с. Аналіз залежностей, представлених на рис. 2.14, показує, що після витримки СК у відключеному стані напруга на його клеммах спадає тим швидше, чим менше він витримувався під номінальною напругою зарядного пристрою  $U_0 = 2,7 \text{ В}$ . Ці нелінійні залежності виникають тому, що при більшій витримці СК під напругою у більш глибокі пори його електродного матеріалу проникають додаткові заряди, збільшуючи таким чином загальну ємність СК при тій же напрузі на його клеммах.

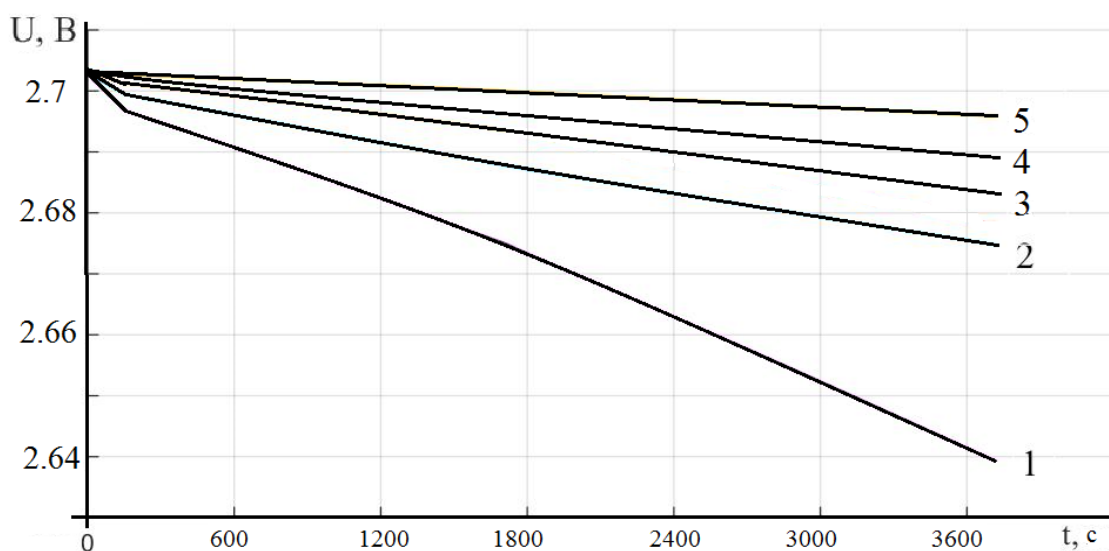


Рис. 2.14. Залежність падіння напруги на клеммах суперконденсатора від часу витримки при постійній напрузі заряду: 1 – 300 с., 2 – 3600 с., 3 – 7200 с., 4 – 14400 с., 5 – 21600 с

На рис. 2.15. показано зміну сталої саморозряду  $\tau$  СК, із збільшенням тривалості витримки суперконденсаторів при номінальній напрузі 2,7 В ця стала саморозряду зростає лінійно. Це знову ж таки пояснюється збільшенням загального заряду суперконденсатора та його ємності [85].

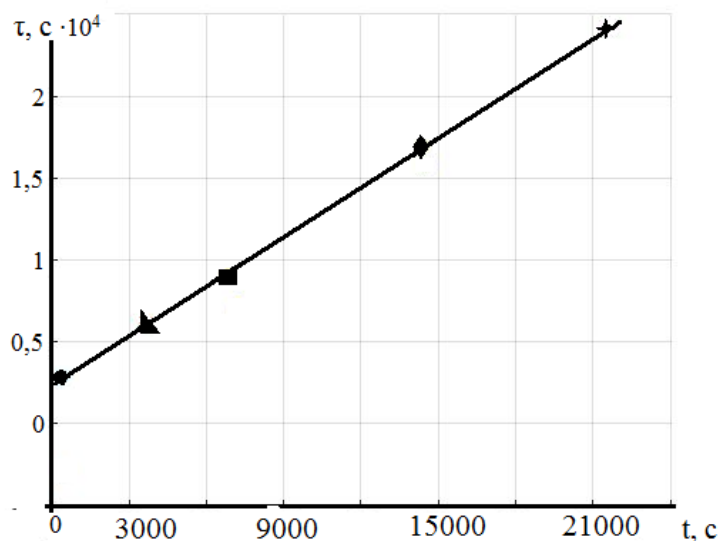


Рис. 2.15. Графік зміни сталої саморозряду  $\tau$  СК від часу витримки

#### 2.4. Системи балансування напруги на окремих елементах акумулюючої системи

Незважаючи на підбір суперконденсаторів перед з'єднанням їх у батарею, після багатьох циклів заряду/розряду СК їхні параметри змінюються, що приводить до нерівномірного розподілу падіння напруги на окремих елементах батареї. З метою підтримки рівномірності такого розподілу в батареї СК використовувалися контролери балансування напруги на окремих елементах за схемою, яка показано на рис. 2.16 [86].

Принцип роботи такого активного балансування наступний. Коли напруга на суперконденсаторі перевищує 2,7 В, транзистор VT1 відкривається і починає

пропускати струм, забезпечуючи розряд суперконденсатора. При розряді напруга на суперконденсаторі спадає. Коли різниця потенціалів на зовнішніх клеммах суперконденсатора стає менше  $2,7\text{ В}$ , транзистор VT1 закривається, струм через нього не протікає і проходить процес зарядки суперконденсаторів. За допомогою мікросхеми TL 431 забезпечується регулювання напруги спрацьовування транзистора VT1. Таким чином запропонований приладу для балансування напруги на окремому суперконденсаторі акумулюючої батареї від перезаряду, що використовує мікросхему в якій джерело опорної напруги знаходиться в одному корпусі з операційним підсилювачем, що зменшує число елементів при монтажі приладу та його габаритні розміри, а також знижує споживання електричного струму в режимі очікування і дає можливість рівномірно зарядити кожен елемент акумулюючої батареї, що дозволить підвищити її надійність роботи і збільшити термін експлуатації.

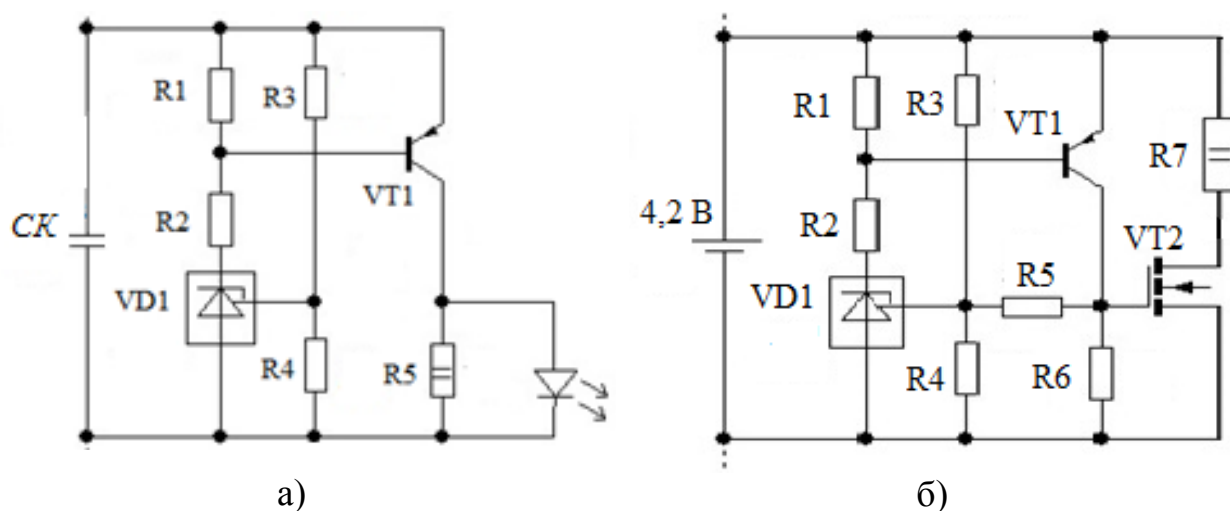


Рис. 2.16. Контролер балансування напруги на окремому елементі АКБ:

а) схема балансування для суперконденсатора; б) для Li-ion елемента

Аналогічна система балансування була використана і в Li-ion акумулюючих батареях. Через різні внутрішні опори після багатьох циклів заряду / розряду

спостерігається відмінність напруги на окремих елементах акумулюючої системи. Для балансування напруги було використано схему активного балансування зображену на рис. 2.16 б).

Її принцип роботи аналогічний, як і для суперконденсаторів, за винятком того, що добавлений польовий транзистор VT2, який дозволяє комутувати більш високі струми. Також змінені номінали резисторів R3, R4 для того, щоб змінити напругу відкривання мікросхеми TL 431. Схеми активного балансування напруги, які зображені на рис. 2.16 а) і б) призначені тільки для захисту окремого елемента в акумулюючій системі.

## Висновки

1. Розроблено методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання світлових і темнових вольт-амперних характеристик ФЕП, визначення струму і напруги максимальної потужності споживача, зворотнього струму насичення р-п переходу.

2. Запропонована модель сонячного елемента. Експериментально визначено параметри даної моделі і коефіцієнт корисної дії автономної системи живлення.

3. В якості акумулюючої системи для автономного джерела живлення ОУ запропоновано батарею із суперконденсаторів.

4. Встановлено лінійну залежність ємності СК від величини напруги зарядження. Проведено вимірювання внутрішнього опору вибірки суперконденсаторів, середнє значення якого  $R_{en} \approx 11 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$  і його відхилення для різних напруг зарядки не перевищувало 5 %.

5. Встановлено, що із збільшенням тривалості заряду суперконденсаторів при номінальній напрузі 2,7 В від 300 с. (5 хв.) до 21600 с. (360 хв.) збільшується час їх саморозряду від  $0,3 \cdot 10^4$  до  $2,4 \cdot 10^4$  с.

6. Запропоновано систему регулювання процесів заряду/розряду батареї суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів з використанням пристрою балансування напруги на окремих їх елементах (Патент на корисну модель №116216).

7. Проведено моделювання впливу коефіцієнта ідеальності діода і зворотнього струму насичення діода на  $U_{xx}$ . Показано, що при збільшенні струмів насичення діода від  $I_0=4 \text{ мкА}$  до  $I_0=40 \text{ мкА}$  відбувається зменшення  $U_{xx}$  від 21,6 до 19 В, що в свою чергу знижує вихідну потужність.

### РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### 3.1. Вимірювання потоку сонячного випромінювання

Величина сонячного потоку, яка попадає на поверхню Землі, залежить від географічних координат місцевості та її кліматичних умов. Для вивчення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання вибраної місцевості, було розроблено і змонтовано вимірювальну установку, блок-схема якої зображена на (рис. 3.1) [87-89]. Електрична схема установки приведена у додатку А. Дана установка дозволяє проводити вимірювання та запис густини потоку сонячного випромінювання в реальному часі з інтервалом 1 хв.



Рис. 3.1. Блок-схема вимірювальної установки

До складу установки входять:

- мікроконтролер Atmega 32, що має 32 КБ Flash-пам'яті, 2 КБ SRAM, 32 робочих регістра, який здійснює обробку і запис отриманих даних з 10-бітного аналогово-цифрового перетворювача;
- накопичувач даних MicroSD;
- регульоване навантаження;
- сонячна батарея ALM-50M;
- піранометр.

Для запису часу реєстрації даних використана мікросхема реального часу DS1307 з інтерфейсом I2C з резервним джерелом живлення, що дозволяє записувати, крім даних з АЦП, час отримання цих даних. Така функція корисна при аналізі даних і складанні статистики їх зміни.

Дані, з вбудованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача, зберігалися на карті пам'яті MicroSD з файловою системою FAT32 в форматі CSV, з певним встановленим інтервалом, який можна змінювати. Зовнішній вигляд блоку вимірювання представлений на рис. 3.2.

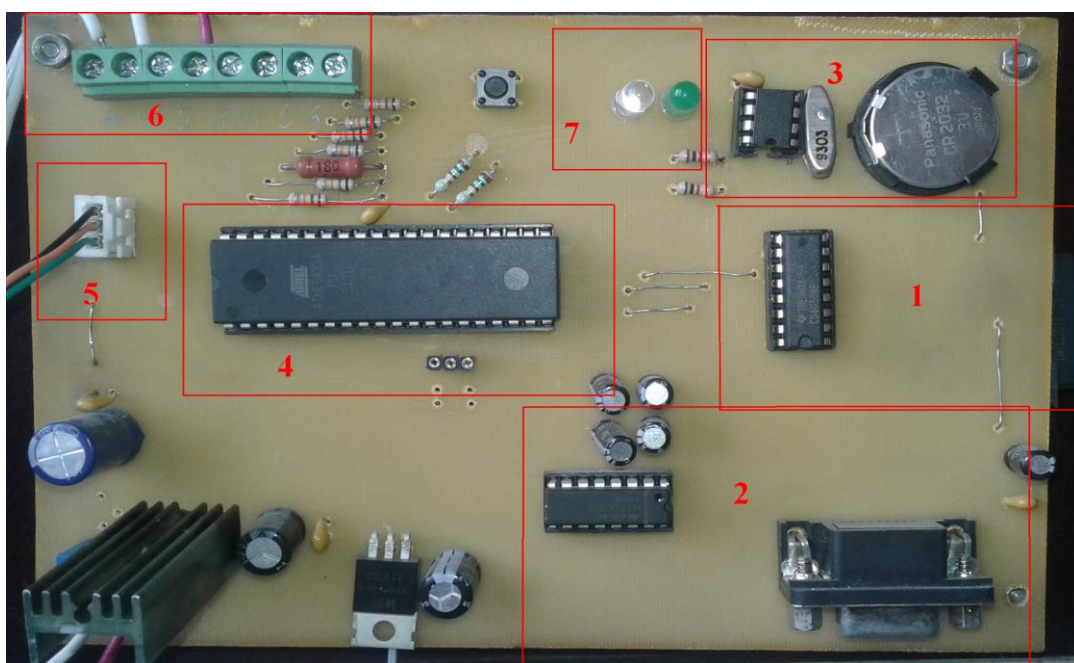


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд блоку вимірювання та запису даних

- 1 – MicroSD карта; 2 – порт RS232; 3 – годинник реального часу;  
 4 – мікроконтролер ATmega32; 5 – температурний датчик; 6 – виводи АЦП;  
 7 – світлодіоди: зелений – живлення, червоний – запис даних

Дана установка дозволяє проводити вимірюванням густини енергетичного потоку сонячного випромінювання, також вимірювання кількості електроенергії, генерованої сонячною батареєю. Для цього використано СБ типу ALM-50M, з резистивним регульованим навантаженням [90]. Електрична схема енергетичного



блоку установки приведена на рис. 3.3. Напруга з виходу СБ подавалась на опір навантаження  $R_n$ , подільник  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_{ш}$ .

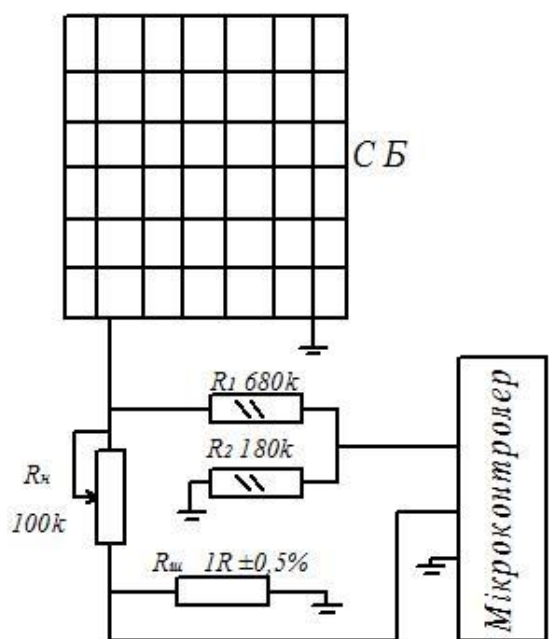


Рис. 3.3. Електрична схема енергетичного блоку

По спаду напруги на  $R_{ш}$  визначено струм навантаження. Похибка використаного шунта становила  $\pm 0,5 \%$ . Напругу на виході СБ вимірювали за допомогою подільника  $R_1$ ,  $R_2$ . У подільнику використані високоомні опори, що дозволило звести до мінімуму їх вплив на результати вимірювань. Похибка даного подільника становила  $\pm 2 \%$ .

Потужність генерованого електричного струму визначали, як добуток  $P=U \cdot I$ . Опір навантаження був підібраний таким, що відповідав режиму максимальної потужності СБ.

Для вимірювання густини енергетичного потоку сонячного випромінювання використовували піранометр, електрична принципова схема якого приведена на рис. 3.4.

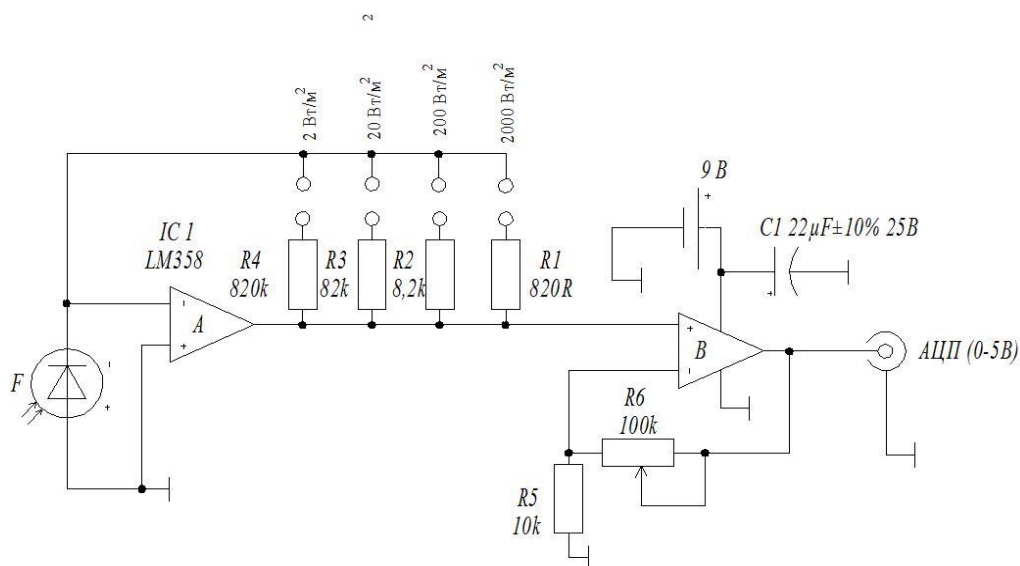


Рис. 3.4. Електрична схема піранометра

Даний прилад складався з фотоприймача  $F$  з монокристалічного кремнію, блоку перетворення струму в напругу  $A$  та блоку підсилення сигналу  $B$ . Різниця напруг на входах диференціального підсилювача завжди близька до нуля, що вказує на те, що фотоприймач працює в режимі короткого замикання. При цьому вхідний струм підсилювача визначався високоомним входом і мав малу величину, а струм зворотного зв'язку дорівнював за величиною струму фотодіода, але мав протилежний напрямок.

Вихідна напруга каскаду в такому режимі дорівнює  $U = R \cdot I$ , де  $R$  – опір резистора в ланцюзі зворотного зв'язку, а  $I$  – фотострум, що генерується фотодіодом. З врахуванням підсилення другого каскаду  $B$ , регульованого в межах від 0 до 5  $B$  та чотирьох резисторів, що перемикаються в колі зворотнього зв'язку першого каскаду  $A$  дозволяли проводити вимірювання густини світлового потоку в межах 2, 20, 200 та 2000  $Bm/m^2$ .

Даний прилад був проградуйований за допомогою вимірювача густини потоку сонячного випромінювання Soler Power Meter DT-1307 у  $Bm/m^2$  [66]. Вимірювання виконувалися при куті нахилу поверхні фотоприймача до горизонту  $\alpha = 49^\circ$ , що є оптимальним для широти Тернополя. Всі дослідження проводилися відповідно до ДСТУ EN 60904-1:2009 [91]. Дані записувались на накопичувач і оброблялися в програмному середовищі Matlab.

### **3.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території**

#### **3.2.1. Результати дослідження густини потоку сонячного випромінювання на широті м. Тернополя**

При дослідженні енергетичного потенціалу сонячного випромінювання потрібно враховувати не тільки географічні координати місцевості, але і кліматичні умови [92-96]. На даний час є дані метеослужб по обласних та районних центрах для всієї території України. Вони представлені температурою,

хмарністю, швидкістю вітру, висотою хмар, атмосферним тиском даного регіону [97]. Серед них немає даних про потік сонячного випромінювання.

Для знаходження зв'язку між ступенем хмарності та енергією сонячного випромінювання були проведені експериментальні дослідження густини потоку сонячного випромінювання на широті м. Тернополя. Для цього експериментальну установку, зовнішній вигляд, якої показано на рис. 3.5 та рис. 3.6, було розташовано на терасі 4-го поверху факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського Національного Технічного Університету. Таке розташування фотодатчика не створювало штучного затінення і дозволяло отримати максимально об'єктивні результати вимірювань [98]. Вимірювання виконувалися при куті нахилу поверхні фотоприймача до горизонту  $\alpha = 49^\circ$ , що є оптимальним для широти Тернополя. Дослідження були розпочаті у травні 2016 року і проводилися відповідно до ГОСТ28977-91.

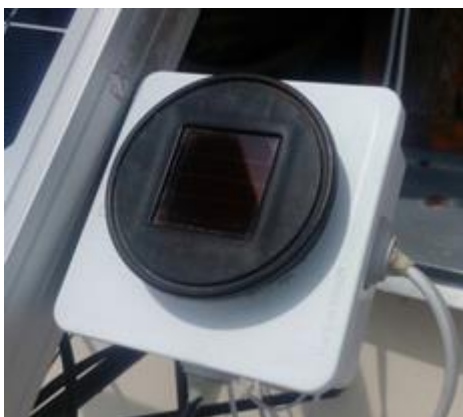


Рис. 3.5. Зовнішній вигляд піранометра



Рис. 3.6. Зовнішній вигляд установки:  
1 – піранометр; 2 – сонячна батарея

На рис. 3.7-3.8 наведено значення густини потоку сонячного випромінювання, а також зміни потужності генерованої сонячною батареєю впродовж травня 2016 року.

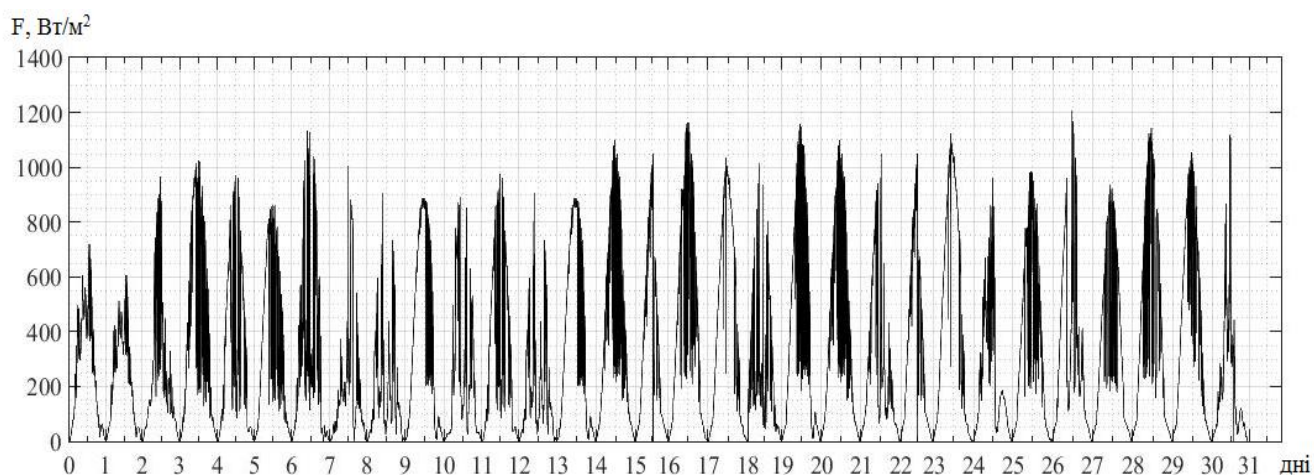


Рис. 3.7. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання протягом травня 2016 р

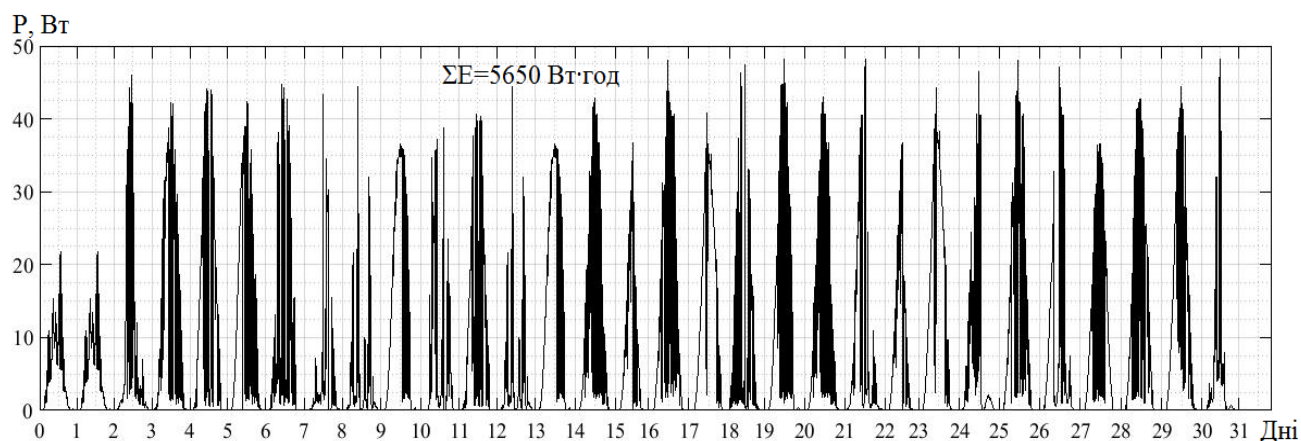


Рис. 3.8. Графік зміни потужності сонячної батареї протягом травня 2016 р

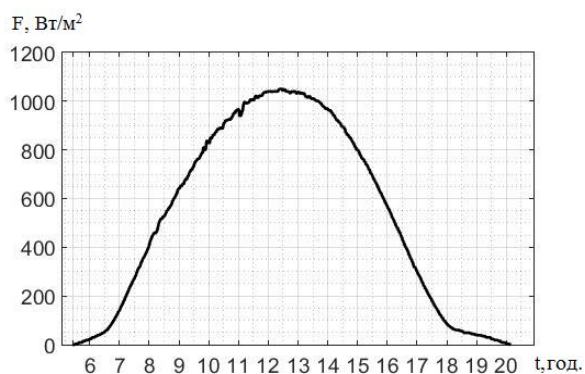
Зміни густини потоку сонячного випромінювання по днях від травня 2016 по квітень 2017 року, які вимірювалися за допомогою даної установки, приведені у додатку Б. Також із графіків зміни потужності сонячної батареї було розраховано енергію у  $Вт \cdot год$ , яку генерувала сонячна батарея протягом кожного місяця 2016-2017 років: травень – 5650; червень – 6406; липень – 6750; серпень – 6625;

вересень – 4700; жовтень – 2320; листопад – 1820; грудень – 1680; січень – 2040; лютий – 2880; березень – 3570; квітень – 4850. Вимірювання проводилися при постійному навантаженні  $R_n = 6 \text{ Ом}$  [99]. Він відповідав максимуму потужності і дорівнював внутрішньому опору СБ.

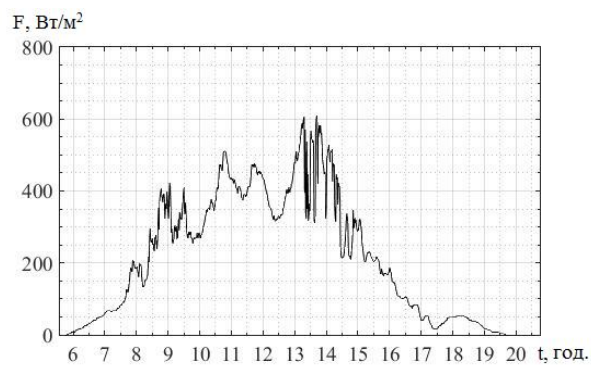
Як уже відмічалось, для запису був вибраний часовий інтервал 1 хв., в межах якого величина зміни енергетичного потоку не перевищувала  $\pm 10 \%$ . Для визначення енергії сонячного випромінювання протягом доби, було проведено статистичну обробку результатів вимірювань, яка зводилась до визначення часового розподілу густини потоку випромінювання. Для цього обмежувалися дискретними значеннями потоку, з інтервалом  $10 \text{ Вт/м}^2$ . Обробку результатів проводили з використанням програмного середовища Matlab і усереднення методом найменших квадратів. Також було проведено аналіз добового розподілу густини потоку сонячного випромінювання, що дозволило зробити поділ днів місяця по величині прозорості атмосфери.

На рис. 3.9 приведені графіки розподілу густини потоку випромінювання для сонячного або безхмарного дня, похмурого (середньої хмарності) та хмарного дня травня 2016 року. Згідно градації ступеня хмарності в 10-ти бальній системі, яка приведена метеослужбою, безхмарному стану атмосфери відповідає від 0 до 3 балів, середньої хмарності 4-6 і хмарного 7-10 балів.

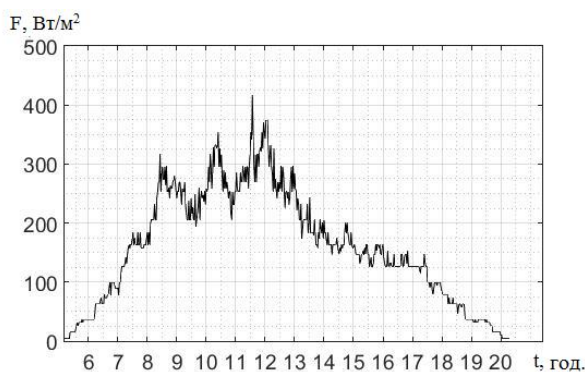
З отриманих графіків було розраховано енергію сонячного випромінювання для сонячного  $E=6,03 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ , похмурого  $E=2,8 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$  та хмарного дня  $E=1,54 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ , що попадає на площадку  $1 \text{ м}^2$ , розташовану під кутом  $49^\circ$  до горизонту. Значення сумарної енергії сонячного випромінювання  $E$  протягом місяця та середньодобові значення для кожного місяця  $E_{\text{сер}}$  за період 2016 - 2018 роки приведені в табл. 3.1.



а)



б)



в)

Рис. 3.9. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання в травні 2016 року: а) сонячного дня; б) похмурого дня; в) хмарного дня

Таблиця 3.1

Густини енергії сонячного випромінювання за період 2016-2018 років

Місяць	2016 р.		2017 р.		2018 р.	
	Сумарна енергія $E$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Сумарна енергія $E$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Сумарна енергія $E$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$
Січень			52,1	1,7	55	1,8
Лютий			68	2,4	70,2	2,5
Березень			99,4	3,3	98,6	3,2
Квітень			110,2	3,7	114	3,8
Травень	134,7	4,3	131	4,2		

Продовження таблиці 3.1

Місяць	2016 р.		2017 р.		2018 р.	
	Сумарна енергія $E$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Сумарна енергія $E$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Сумарна енергія $E$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$	Середньодобова енергія $E_{\text{сер}}$ , $\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$
Червень	136,7	4,5	138,6	4,6		
Липень	144	4,6	146,8	4,7		
Серпень	141,3	4,5	142,5	4,6		
Вересень	100,7	3,3	105,2	3,5		
Жовтень	48,7	1,6	71,3	2,3		
Листопад	38,3	1,3	48,8	1,6		
Грудень	35,4	1,2	39,6	1,3		

З отриманих даних, було розраховано кількість сонячних, похмурих та хмарних годин протягом кожного місяця, а також середньодобову густину потоку сонячного випромінювання для сонячного  $F_c$ , похмурого  $F_n$  та хмарного  $F_x$  дня, і середнє їх значення  $F_{\text{сер}}$ , які приведені в табл. 3.2. Такі ж розрахунки були проведені і для інших місяців.

Таблиця 3.2

Помісячний розподіл хмарності та густини потоку сонячного випромінювання за період 2016-2017 років

Місяць	Кількість хмарних годин	$F_x$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	Кількість похмурих годин	$F_n$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	Кількість сонячних годин	$F_c$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	$F_{\text{сер}}$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$
Травень	151,4	174	115,1	265	174,7	465	
Червень	144,2	189	105,4	275	196,3	489	
Липень	131,9	230	95	320	240	523	

Продовження таблиці 3.2

Місяць	Кількість хмарних годин	$F_x$ $Вт/м^2$	Кількість похмурих годин	$F_n$ $Вт/м^2$	Кількість сонячних годин	$F_c$ $Вт/м^2$	$F_{сер}$ $Вт/м^2$
Серпень	130	155	90	270	245	490	
Вересень	135	105	83	205	190	370	
Жовтень	205	75	50	115	28	161	
Листопад	192	64	54	142	16	153	
Грудень	171	80	23	145	37	240	
Січень	197	81	27	157	46	330	
Лютий	185	126	46	197	59	370	
Березень	169	145	75	217	131	402	
Квітень	157	153	102	240	166	453	

На рис. 3.10 приведено розподіл густини енергетичного потоку сонячного випромінювання протягом травня - жовтня 2016 року. Як видно з графіків для травня та червня (рис. 3.10 а, б) розподіл густини потоку сонячного випромінювання до  $200 \text{ Вт/м}^2$  займає інтервал часу від 300 до 1400 хв., а потоки вище  $200 \text{ Вт/м}^2$  розподілені в інтервалі часу від 50 до 300 хв. Часовий розподіл енергетичних потоків від 0 до  $200 \text{ Вт/м}^2$  описується експоненціальним законом: для травня  $F=334e^{-0.0022\tau}$ , для червня  $F = 324e^{-0.0024\tau}$ .

Для липня, серпня і вересня (рис. 3.10 в, г, д) часовий розподіл енергетичного потоку, має такий же характер, як і для травня і червня, але для потоків від 800 до  $900 \text{ Вт/м}^2$  спостерігається збільшення часу їх дії, що відображається максимумами на графіках. Часова залежність енергетичних потоків від 0 до  $200 \text{ Вт/м}^2$  цих місяців, описується експоненціальним законом  $F=250e^{-0.0024\tau}$ .



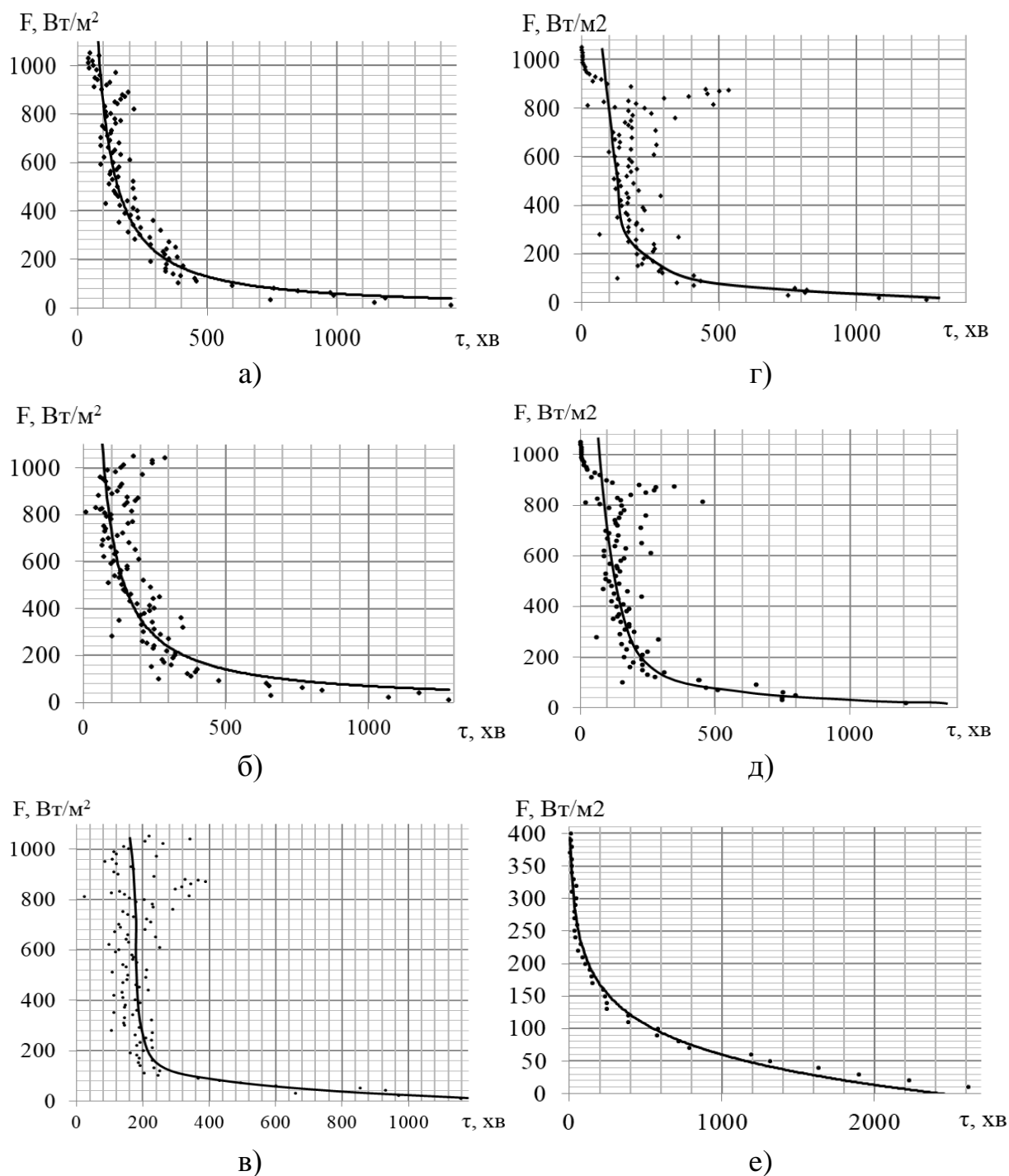


Рис. 3.10. Місячний розподіл густини потоку сонячного випромінювання:

а) травня; б) червня; в) липня; г) серпня; д) вересня; е) жовтня

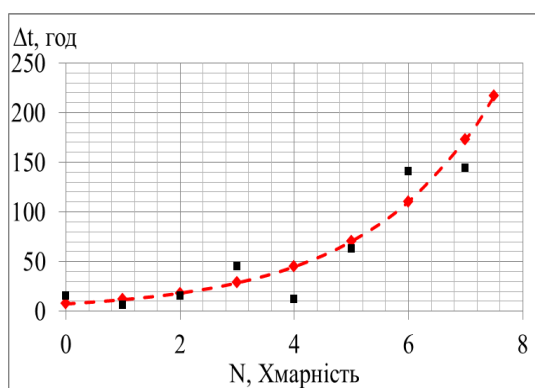
Осінньо - зимовий період на широті Тернополя характеризується зменшенням часу дії потоків з енергією більше  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Часовий розподіл густини енергетичного потоку сонячного випромінювання для жовтня 2016 року приведено на рис. 3.10 е). Часовий розподіл потоків від 0 до  $200 \text{ Вт/м}^2$  описується

функцією  $F=190e^{-0.001\tau}$ . Аналогічні залежності спостерігалися для листопада, грудня та січня. Часовий розподіл описується функцією  $F=170e^{-0.001\tau}$  [91].

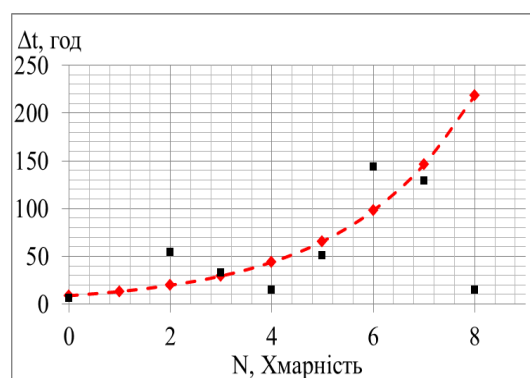
З наближенням до весняного періоду на широті Тернополя збільшується час дії потоків з енергією більше  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Для енергетичних потоків менше  $200 \text{ Вт/м}^2$  часовий розподіл для лютого описується залежністю  $F=205e^{-0.0014\tau}$ . Аналогічні залежності спостерігалися для березня та квітня і часовий розподіл описується функцією  $F=275e^{-0.002\tau}$ .

### 3.2.2. Вплив ступеня хмарності на густину енергії сонячного випромінювання

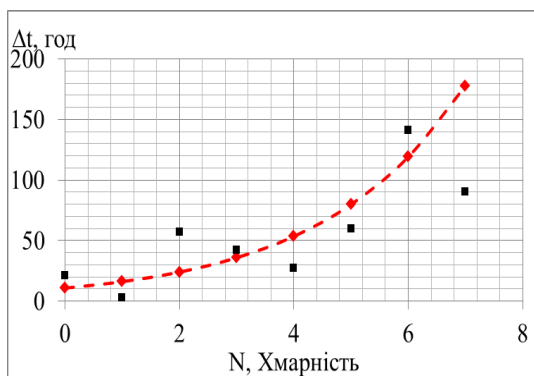
Для встановлення розподілу тривалості стану атмосфери з ступенем хмарності  $N$  було проведено статистичну обробку даних, які бралися із сайту метеослужби [97]. З отриманих даних було побудовано графіки часу  $\Delta t$  тривалості даного ступеня хмарності для кожного місяця 2016-2017 років. На даних графіках пунктирними лініями зображені усереднені значення тривалості часу з даним ступенем хмарності.



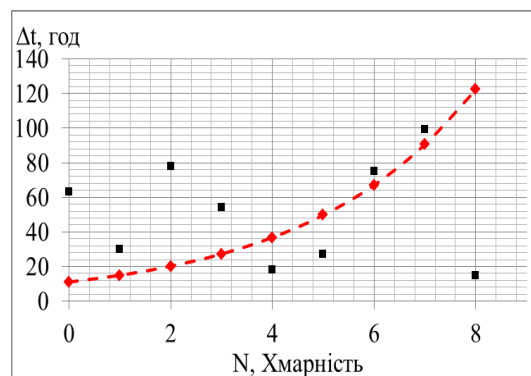
а)



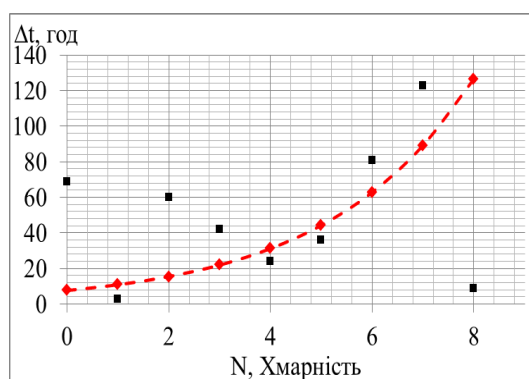
б)



в)



г)



д)

Рис. 3.11. Розподіл тривалості ступеня хмарності протягом:  
а) травня; б) червня; в) липня; г) серпня; д) вересня 2016 року

У весняно-літній період (рис. 3,11 а, б, в, г, д) збільшується час безхмарного стану атмосфери. Так, починаючи від травня кількість часу із ступенем хмарності 0-3 зростає від 20 до 80 год., а із ступенем хмарністю 4-6 від 20 до 150 год. Також зменшується час із ступенем хмарності 7-8 від 150 до 100 год.

Осінь - зимовий період (рис. 3.12 а, б, в) починаючи з жовтня характеризується зменшенням тривалості часу із ступенем хмарності від 0 до 3, який займає інтервал 10-30 год., а ступінь хмарності 4-6 від 35 до 5 год. Також збільшується час із ступенем хмарності 7-8, який розподілений в інтервалі часу від 80 до 180 год.

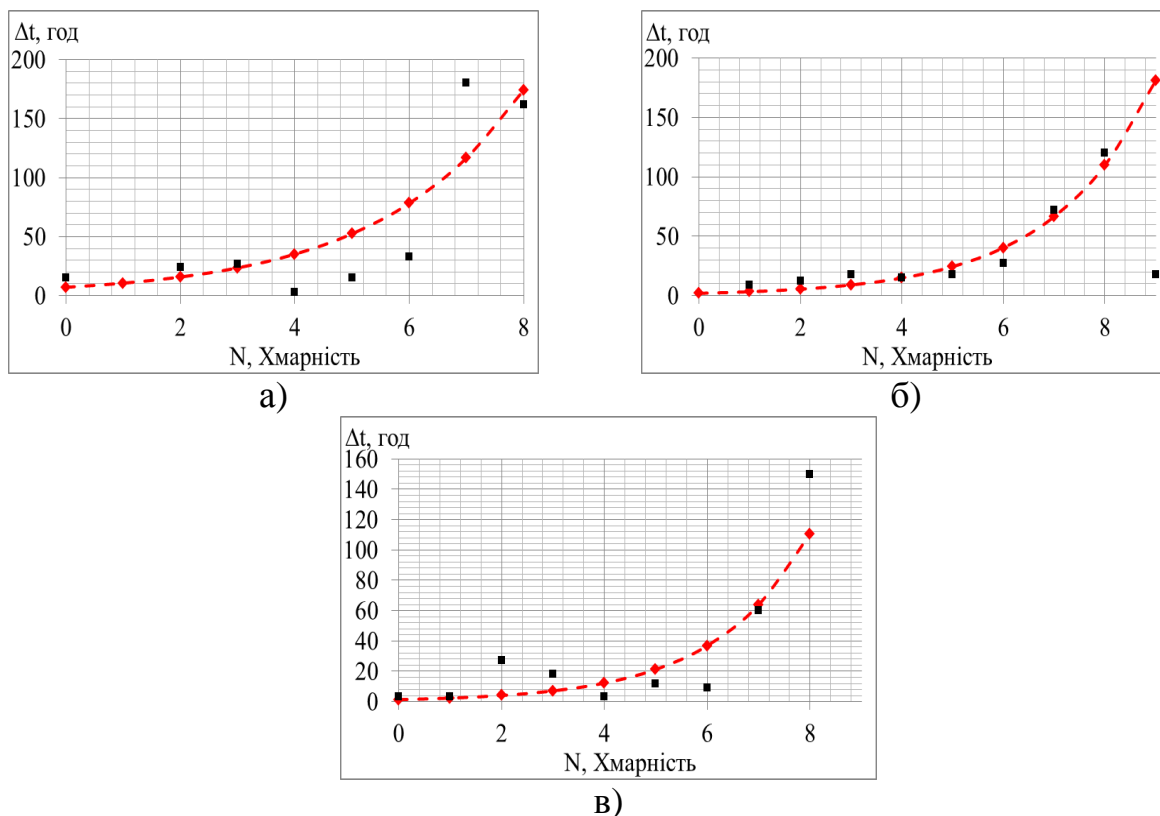


Рис. 3.12. Місячний розподілу тривалості ступення хмарності протягом: а) жовтня б) листопада; в) грудня 2016 року.

На рис. 3.13. приведені графіки для січня, лютого, березня і квітня 2017 року. Як видно з графіків ступінь хмарності від 0 до 3 займає інтервал часу від 10 до 20 год., ступінь хмарності від 3 до 6 розподілений в інтервалі часу від 20 до 50 год., а ступінь хмарності 7-8 в інтервалі часу від 90-140 год.

На основі усереднених значень тривалості відповідного ступеня хмарності протягом місяця були отримані залежності  $\Delta t = f(N)$ , які приведені в табл. 3.3. Обробку та розрахунок проводили з використанням програмного середовища Microsoft Exel.

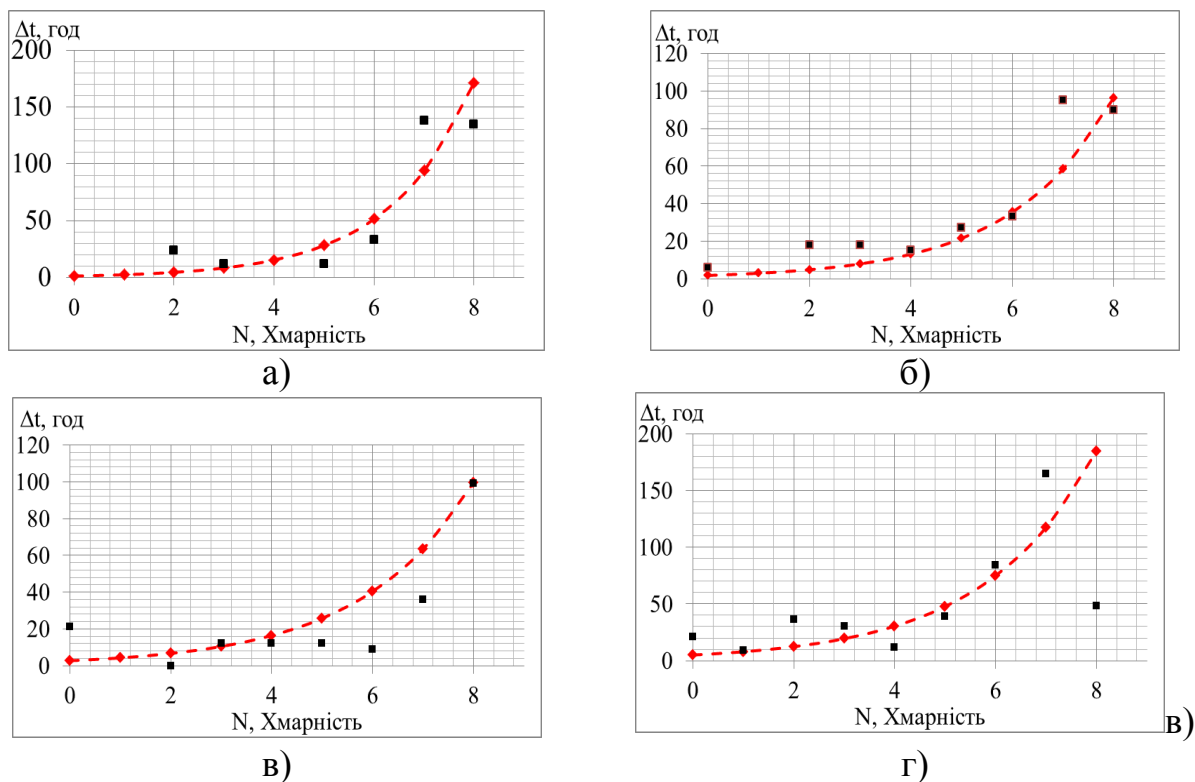


Рис. 3.13. Розподіл тривалості ступеня хмарності протягом:

а) січня; б) лютого; в ) березня; г) квітня 2017 року

Таблиця 3.3

Залежність тривалості стану атмосфери із даним ступенем хмарності від його величини за 2016-2017 роки

Місяць	$\Delta t = f(N)$
Травень	$\Delta t = 7,413e^{0.45N}$
Червень	$\Delta t = 8,89e^{0.4N}$
Липень	$\Delta t = 10,81e^{0.4N}$
Серпень	$\Delta t = 11,09e^{0.3N}$
Вересень	$\Delta t = 7,7e^{0.35N}$
Жовтень	$\Delta t = 7,1e^{0.4N}$
Листопад	$\Delta t = 2,01e^{0.5N}$
Грудень	$\Delta t = 1,36e^{0.55N}$
Січень	$\Delta t = 1,14e^{0.6N}$
Лютий	$\Delta t = 1,767e^{0.5N}$
Березень	$\Delta t = 2,718e^{0.45N}$
Квітень	$\Delta t = 5,04e^{0.45N}$

Для знаходження зв'язку між потоком сонячної енергії та кліматичними умовами місцевості, було проведено співставлення результатів вимірної густини сонячної енергії із значеннями розрахованими за даними середнього трьохгодинного ступеня хмарності, взятих із даних метеослужби [97]. Відхилення вимірного потоку сонячної енергії і розрахованого за ступенем хмарності для трьохгодинного інтервалу та інтервалу одна доба не перевищувало 5 %. Це дозволило для подальших розрахунків використати середньодобові значення ступеня хмарності взяті із даних метеослужби. Середню ступінь хмарності та середню енергію сонячного випромінювання розраховували по середньому арифметичному їх значенню [98,100].

В табл. 3.4 приведена відповідність середньодобової густини енергії сонячного випромінювання  $E_{сер}$ , ( $кВт \cdot год / м^2$ ) ступеню середньодобової хмарності на території м. Тернополя для кожного місяця протягом 2016-2017рр.

Таблиця 3.4

Відповідність середньодобової поверхневої густини енергії сонячного випромінювання ступеню середньодобової хмарності на території м.Тернополя протягом 2016-2017років (кут нахилу поверхні  $49^\circ$ )

Місяці	Ступінь хмарності									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Травень, $E_{сер}$	6	5,7	5,36	4,9	4,3	3,8	3,3	2,6	-	-
Червень, $E_{сер}$	-	6,4	5,4	5,2	4,6	4,05	3,5	-	-	-
Липень, $E_{сер}$	-	-	6,2	5,4	4,55	3,8	3,4	-	-	-
Серпень, $E_{сер}$	6,9	6,4	5,7	5,1	4,25	3,65	2,95	2,2	-	-
Вересень, $E_{сер}$	6,2	6,05	5,4	5,2	3,5	3,1	5,3	1,6	0,85	-
Жовтень, $E_{сер}$	-	-	3,6	3,5	3,05	2,2	-	1,4	0,8	-
Листопад, $E_{сер}$	-	-	-	-	-	2,05	1,7	1,45	0,9	-
Грудень, $E_{сер}$	-	-	2,75	2,4	2	-	1,2	1,05	0,75	-
Січень, $E_{сер}$	-	-	-	2,97	2,6	2	1,7	1,4	0,95	-
Лютий, $E_{сер}$	4,82	-	-	3,55	-	2,8	2,4	2	1,6	-
Березень, $E_{сер}$	5,8	5,6	-	-	3,8	3,4	2,8	2,2	1,8	-
Квітень, $E_{сер}$	-	5,8	5,4	5	4,55	3,8	3,35	2,7	-	-

На рис. 3.14 і 3.15 приведена залежність енергії сонячного випромінювання за добу від середнього ступеня хмарності протягом кожного місяця 2016-2017 років. Графіки будувалися з використанням усереднених експериментальних даних енергії сонячного випромінювання та усередненого ступеня хмарності за одну добу. Обробку та розрахунок результатів проводили з використанням програмного середовища Microsoft Excel і усереднення методом найменших квадратів.

Алгоритм розрахунків: створення масиву даних хмарності і даних вимірювань потоку сонячної енергії; усереднення даних; побудова графіків залежностей енергії сонячного випромінювання від хмарності  $E=f(N)$ , розрахунок середньодобової та сумарної енергії сонячного випромінювання протягом місяця та року.

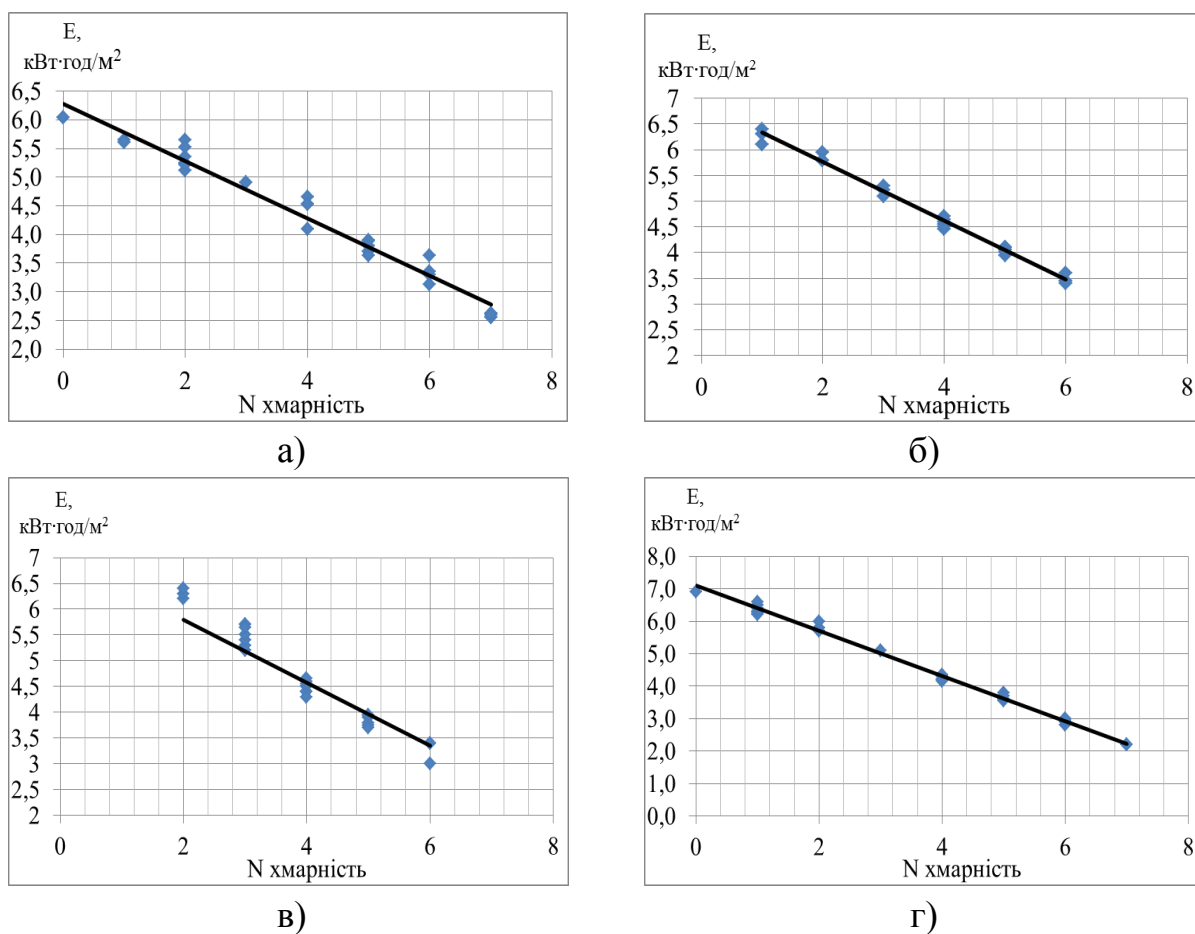


Рис. 3.14. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу від ступеня хмарності протягом: а) травня; б) червня; в) липня; г) серпня 2016-2017 років.

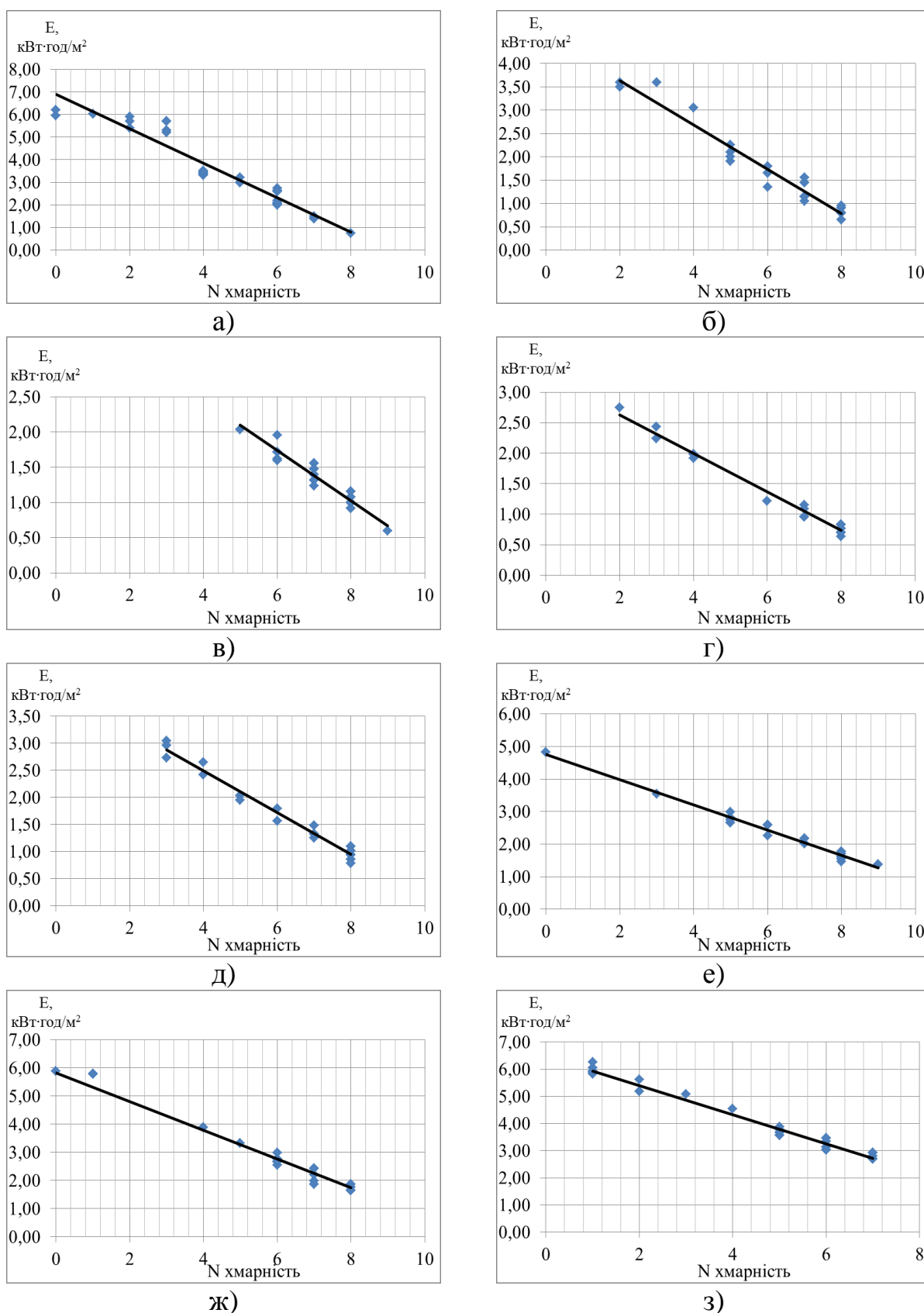


Рис. 3.15. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу від ступеня хмарності протягом: а) вересня; б) жовтня; в) листопада; г) грудня; д) січня; е) лютого ж) березня; з) квітня 2016-2017 років.



Враховуючи, що тривалість сонячного випромінювання впродовж доби і кут нахилу сонця до горизонту протягом року змінюються, такі ж співставлення між потоком сонячної енергії та кліматичними умовами місцевості, а саме хмарністю, було проведено для кожного місяця 2016-2017 років. Результати отриманих залежностей середньодобової сонячної енергії від середньої протягом доби ступеня хмарності  $E_{сер}=f(N)$  приведені в табл. 3.5. Де  $E_{сер}$  – густина енергії сонячного випромінювання ( $кВт\cdot год/м^2$ ) на поверхні, розташованій під кутом  $49^\circ$  до горизонту протягом однієї доби, та  $N$  – середня ступінь хмарність, протягом однієї доби.

Таблиця 3.5

Залежності середньодобової сонячної енергії від середньодобової хмарності

Місяць	$E_{сер}=f(N)$
Травень	$E_{сер} = -0,5467 \cdot N + 6,2689$
Червень	$E_{сер} = -0,5575 \cdot N + 7,0102$
Липень	$E_{сер} = -0,7624 \cdot N + 7,8964$
Серпень	$E_{сер} = -0,677 \cdot N + 7,1902$
Вересень	$E_{сер} = -0,6072 \cdot N + 5,9676$
Жовтень	$E_{сер} = -0,4736 \cdot N + 4,567$
Листопад	$E_{сер} = -0,4 \cdot N + 4,195$
Грудень	$E_{сер} = -0,32 \cdot N + 3,263$
Січень	$E_{сер} = -0,386 \cdot N + 4,0385$
Лютий	$E_{сер} = -0,3871 \cdot N + 4,7581$
Березень	$E_{сер} = -0,5095 \cdot N + 5,814$
Квітень	$E_{сер} = -0,5334 \cdot N + 6,455$

На основі отриманих залежностей та даних метеослужб було розраховано середньомісячну енергію сонячного випромінювання за 2012-2017 роки. Дані

приведені в табл. 3.6. Також було проведено розрахунок сумарної річної та середньодобової густини енергії сонячного випромінювання.

Сумарна річна енергія за даний період коливається в межах  $994,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$  -  $1130 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ , а середньодобова в межах  $2,7$ - $3,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ .

Таблиця 3.6

Середньомісячна густина енергії сонячного випромінювання для 2012-2017 років

Місяць	2017	2016	2015	2014	2013	2012	Середнє значення
	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	$E, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$
Січень	54	45	44	39,3	45	55	47,1
Лютий	72	65	71,3	68,9	58,6	76,5	68,8
Березень	104	82,4	98,9	98,5	81,3	102,2	94,6
Квітень	108	105,2	112,9	100,9	119,5	108,2	109,1
Травень	131	134,7	113,9	101,5	107,8	110	116,5
Червень	130	136,7	133,6	118,9	123,3	123,3	127,7
Липень	135	144	133,3	121,7	129,7	138,1	133,6
Серпень	138	141,3	136,7	123,1	129,9	125,3	132,4
Вересень	98	100,7	75,3	102,6	66,9	94,6	89,7
Жовтень	73	48,7	56,2	72,3	51,8	51,3	58,9
Листопад	48	38,3	47,3	45,5	42,1	38,5	43,3
Грудень	39	35,4	48	32,9	38,5	36,6	38,4
Сумарна річна енергія	1130	1077,7	1071,7	1026,3	994,4	1059,7	1060

Графік помісячної зміни густини потоку сонячної енергії протягом 2012-2017 років приведений на рис. 3.16. На основі усереднених помісячних даних протягом шести років (2012-2017 рр.), було побудовано графік зміни

середньомісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом року, який представлений на рис. 3.17.

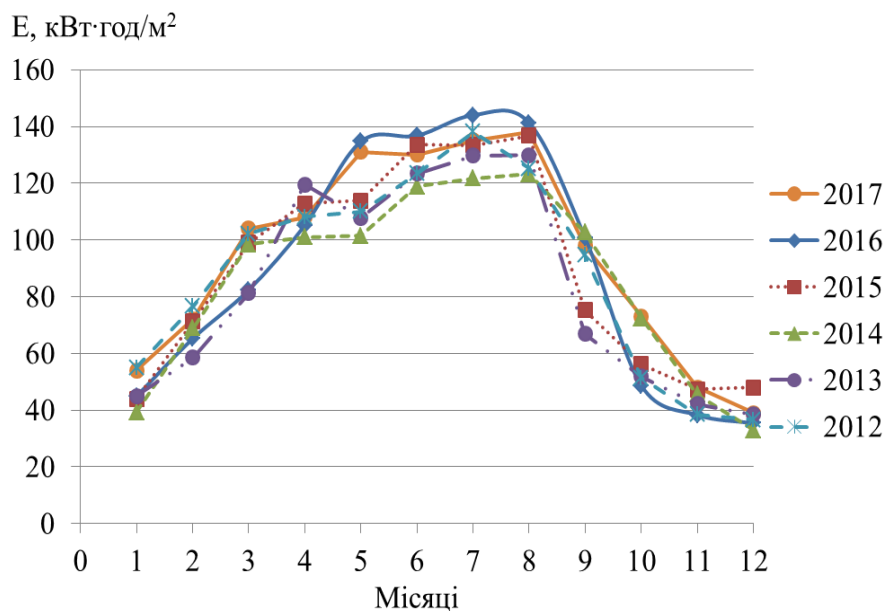


Рис. 3.16. Графік помісячної зміни густини енергії сонячного випромінювання для кожного місяця за 2012 - 2017 рік

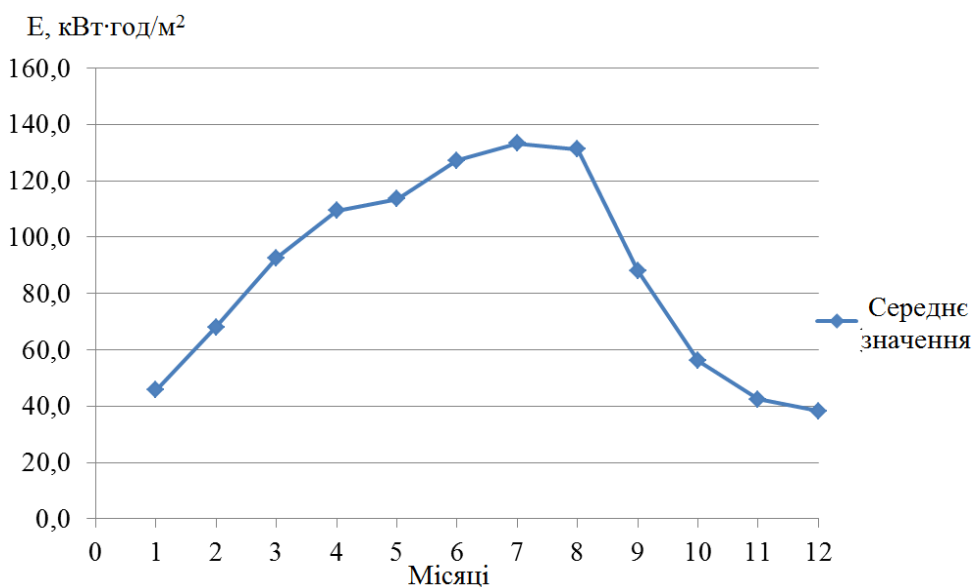


Рис. 3.17. Графік зміни середньомісячного значення густини енергії сонячного випромінювання протягом року

На рис. 3.18 приведені гістограми середньорічної поверхневої густини сонячної енергії протягом 2012-2017 років та її середнє значення за даний період. Із рис. 3.18 видно, що відхилення від середньорічного значення поверхневої густини енергії сонячного випромінювання не перевищує  $\pm 70 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , що складає 7 %. Тому для техніко-економічного розрахунку сонячних енергетичних систем в Тернопільському регіоні доцільно використовувати середньорічне значення поверхневої густини сонячної енергії  $1060 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ .

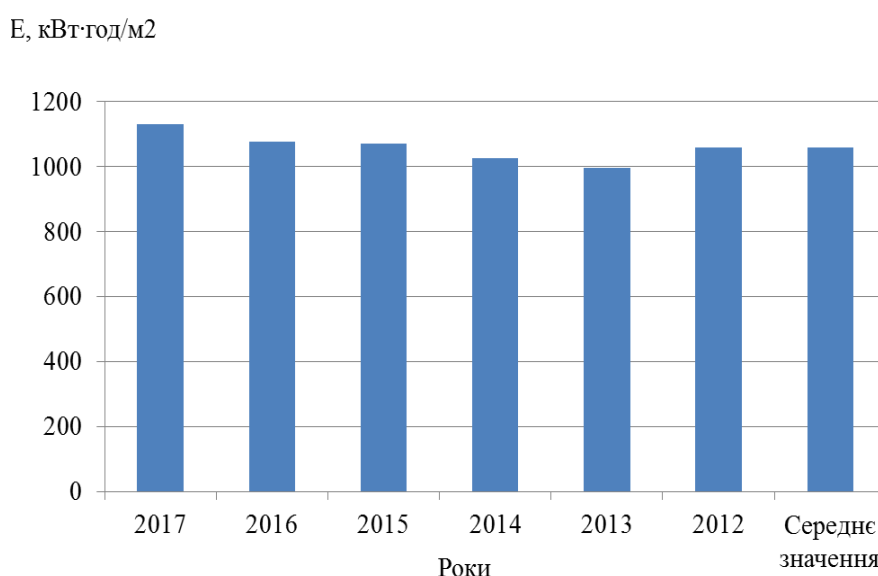


Рис. 3.18. Гістограма середньорічної поверхневої густини сонячної енергії протягом 2012-2017 років та її середнє значення

Графік місячних змін сонячної енергії протягом 2016 року приведено на рис. 3.19. На ньому ж приведений графік помісячного споживання електроенергії  $W_{oc}$  на зовнішнє освітлення м. Тернополя, побудований на основі даних приведених у розділі 1.1. (табл. 1.4).

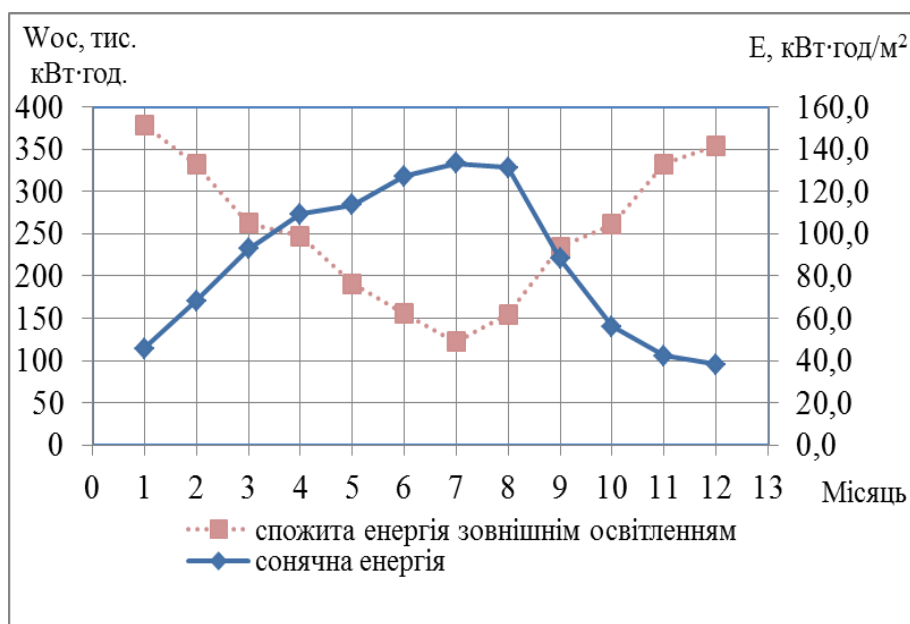


Рис. 3.19. Графік зміни сонячної енергії та спожитої енергії зовнішнім освітленням для м. Тернополя протягом року.

### 3.3. Використання результатів досліджень для моніторингу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Західного регіону України

З метою поширення отриманих залежностей густини енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності на населені пункти Західного регіону були проведені розрахунки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці. Для цього були використані дані метеослужб для цих міст протягом 2017 року. Використовуючи значення середньодобового ступеня хмарності та аналітичні залежності приведені в табл. 3.5, було розраховано середньодобову поверхневу густину енергії сонячного випромінювання  $E_{роз}, кВт·год/м^2$ , для кожного із цих міст, які приведені в додатку В. Розрахунок проводився для поверхні розташованої під кутом  $49^\circ$  до горизонту. На основі розрахованої середньодобової густини енергії сонячного випромінювання (додаток В) та даних метеослужб було розраховано помісячну енергію сонячного випромінювання  $E_{роз}, кВт·год/м^2$  за

2017 рік для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці. Дані приведені в табл. 3.7. Також в даній таблиці приведено помісячну енергію сонячного випромінювання  $E_{NASA}$ ,  $кВт\cdot год/м^2$ , для поверхні розташованої під кутом  $49^\circ$  до горизонту, які були взяті із сайту NASA [109]. На основі розрахованих даних було проведено розрахунок сумарної річної поверхневої густини енергії сонячного випромінювання. Сумарна річна поверхнева густина енергії за даний період для м. Львова становить  $1094 кВт\cdot год/м^2$ , м. Хмельницький –  $1116 кВт\cdot год/м^2$ , м. Івано-Франківського –  $995 кВт\cdot год/м^2$  та м. Чернівці –  $1117 кВт\cdot год/м^2$ , а відхилення від даних, приведених на сайті NASA не перевищує 7-14 %.

Таким чином отримані залежності густини енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності можна використовувати для попереднього моніторингу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Західного регіону на основі даних метеослужб.

Таблиця 3.7

Розрахована густина енергії сонячного випромінювання за 2017 рік, для поверхні розташованої під кутом  $49^\circ$  до горизонту

Місяць	Львів		Хмельницький		Івано-Франківськ		Чернівці	
	$E_{роз}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{NASA}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{роз}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{NASA}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{роз}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{NASA}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{роз}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$	$E_{NASA}$ , $кВт\cdot год$ $/м^2$
Січень	50	58	49	57	51	61	51	59
Лютий	66	75	67	73	64	75	66	77
Березень	90	108	91	108	78	105	88	115
Квітень	105	117	108	116	103	111	113	123
Травень	125	139	130	145	98	125	110	151
Червень	132	133	135	138	124	126	134	144
Липень	139	138	141	140	129	132	146	151
Серпень	145	136	142	138	142	132	154	147

Продовження таблиці 3.7

Місяць	Львів		Хмельницький		Івано-Франківськ		Чернівці	
	$E_{роз}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{NASA}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{роз}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{NASA}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{роз}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{NASA}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{роз}$ кВт·год /м <sup>2</sup>	$E_{NASA}$ кВт·год /м <sup>2</sup>
Вересень	94	106	96	108	81	104	98	114
Жовтень	61	81	68	84	56	84	72	90
Листопад	48	54	48	53	37	59	45	55
Грудень	39	48	41	48	32	51	40	52
Сумарна річна енергія	1094	1193	1116	1208	995	1165	1117	1278

Із розрахованих даних за 2017 рік для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці, було побудовано графік зміни помісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом 2017 року, який представлений на рис. 3.20. Як видно із рис. 3.16 і рис. 3.20 ефективна робота сонячних батарей можлива в період з березня по вересень. В інші місяці, в результаті зменшення сонячного дня, а також збільшення хмарних днів, ефективність сонячних систем зменшується.

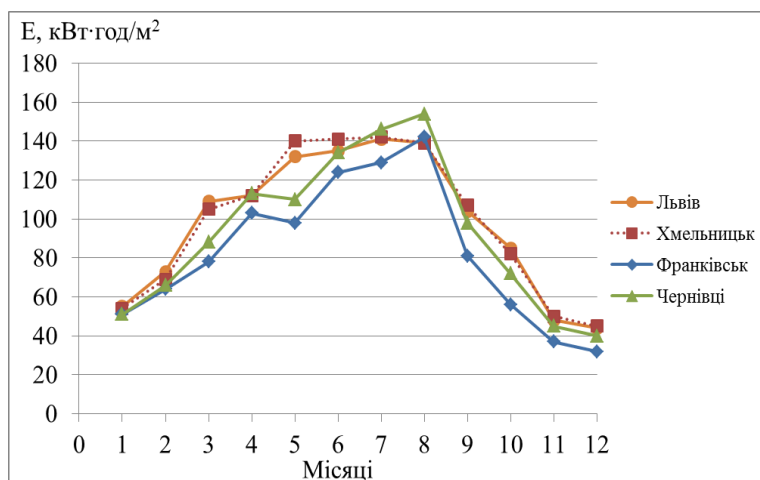


Рис. 3.20. Графік зміни густини енергії сонячного випромінювання протягом кожного місяця за 2017 рік

### Висновки:

1. Запропоновано методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання, що дало змогу провести розрахунок часового розподілу поверхневої густини сонячного випромінювання для м. Тернополя, та визначити густину енергії сонячного випромінювання протягом кожного місяця 2016-2018 років.

2. Проведено аналіз впливу тривалості ступеня хмарності протягом кожного місяця 2016-2017 рр. на величину густини потоку сонячного випромінювання.

3. Встановлено аналітичний зв'язок між середньодобовою поверхневою густиною енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності  $E_{сер}=f(N)$ . Це дозволило провести розрахунок середньомісячної та середньорічної густини енергії сонячного випромінювання для 2012-2017 років на території м. Тернополя, яка змінюється в межах  $995-1130 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , а середнє значення протягом даного періоду дорівнює  $1060 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ . Відхилення протягом 6 останніх років від середнього значення не перевищує 7 %.

4. На основі даних метеослужб для населених пунктів західного регіону проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці. Сумарна річна густина енергії за 2017 рік для м. Львова становить  $1094 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , м. Хмельницький –  $1116 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , м. Івано-Франківського –  $995 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$  та м. Чернівці –  $1117 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , а відхилення від середньорічного значення поверхневої густини енергії сонячного випромінювання в порівнянні з даними, приведеними на сайті NASA складає 7-14 %.



## **РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ ТА ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ**

### **4.1. Розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів**

Блок-схема енергетичної установки приведена на рис. 4.1 [89]. Вона складається з сонячного модуля [93], з блоку Li-іонних акумуляторів або суперконденсаторів, системи керування та світлового приладу.

У даній установці система керування забезпечує вмикання-вимикання СП при певному рівні освітлення, який контролюється по значенню напруги на СБ. Крім того щоб уникнути включення під час сильної хмарності у даній системі присутній таймер, який можна змінювати в межах від 0 до 9 годин. Також дана система здійснює керування зарядом-розрядом АКБ. Алгоритм процесу заряду АКБ приведений на рис. 1.10.

Для економного використання енергії від АКБ, використовується датчик руху в поєднанні з пристроєм регулювання світлового потоку СП на основі ШІМ. При настанні сутінків СП включається в черговому режимі (20-50 % освітленості), а при появі людини в зоні виявлення 10-12 м, система переходить в робочий режим.

При покиданні людиною зони виявлення система повертається в черговий режим. Такий алгоритм роботи системи освітлення дозволяє в середньому на 50 % зменшити споживання енергії від акумуляторної батареї.

Також до складу системи керування входить інвертор для перетворення постійної напруги в змінну та блок балансування напруги на окремому елементі акумуляторної батареї.

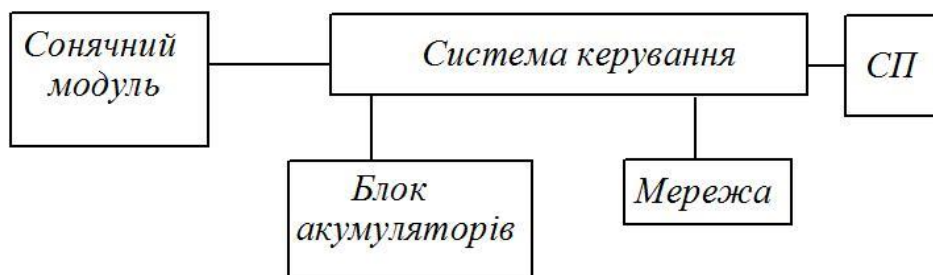


Рис. 4.1. Блок-схема сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів

Вихідними параметрами розрахунку є середньодобове споживання електроенергії для зовнішнього освітлення населеного пункту протягом кожного місяця [102-103].

Генеровану середньодобову електроенергію однією сонячною батареєю  $E_{CB}$  розраховували за формолою:

$$E_{CB} = \mu \cdot E_{сер} \cdot S_0, \quad (4.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт корисної дії сонячної батареї;

$E_{сер}$  – середньодобове значення енергії сонячного випромінювання;

$S_0$  – робоча площа поверхні однієї сонячної батареї  $m^2$ .

Кількість сонячних батарей  $N$  та їх площу  $S$  визначали відношенням спожитої енергії на освітлення  $W_{осв}$  до генерованої енергії однією сонячною батареєю  $E_{CB}$ .

$$N = W_{осв} / E_{CB}. \quad (4.2)$$

$$S = N \cdot 1,66, m^2. \quad (4.3)$$

Для розрахунку накопичувальної системи виходили з того, що енергетична установка зовнішнього освітлення буде працювати протягом 8-13 годин. Для її

реалізації доцільно використати Li-іон акумулятори або суперконденсатори, які мають широкий температурний діапазон експлуатації та низький саморозряд в порівнянні з іншими типами. Для розрахунку було взято Li-іон акумуляторну батарею типу LP48100ES ємністю  $C = 100 \text{ А} \cdot \text{год}$ , номінальною напругою  $48 \text{ В}$  [104].

Необхідну ємність акумуляторної батареї  $C_6$  розраховували за формолою:

$$C_6 = W_{осв} / (U_6 \cdot k), \quad (4.4)$$

де  $W_{осв}$  – спожита енергія на зовнішнє освітлення;

$U_6$  – номінальна напруга акумуляторної батареї;

$k$  – коефіцієнт використання ємності, що враховує яку частину енергії акумуляторної батареї можна використати (для Li-іон акумуляторів  $k = 0,8$ , а суперконденсаторів  $k = 1$ ).

Кількість акумуляторних батарей:

$$n = C_6 / (C \cdot \mu_6), \quad (4.5)$$

де  $\mu_6$  – коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї (для Li-іон акумуляторів та суперконденсаторів  $\mu_6$  становить  $0,99$ );

$C$  – ємність однієї акумуляторної батареї.

Застосовуючи послідовно-паралельне з'єднання сонячних батарей, можна регулювати вихідну напругу і струм, що дозволяє підібрати режим роботи всієї сонячної енергетичної установки.

З'єднавши 24 сонячних батареї послідовно і потім об'єднавши їх в два паралельно з'єднаних масиви, отримаємо: номінальну напругу  $732 \text{ В}$ , напругу холостого ходу  $893 \text{ В}$  і струм короткого замикання  $16,4 \text{ А}$ . Для такого з'єднання сонячних батарей доцільно використати систему керування на основі гібридного інвертора типу Growatt 10000HY [105]. Даний інвертор дозволяє перетворювати

постійну напругу з акумуляторних батарей в змінну напругу 220 В. В ньому вбудовано два MPPT контролери заряду-розряду акумуляторної батареї, номінальною напругою 48 В, що забезпечує максимально ефективну роботу сонячної енергетичної установки і дозволяє підключити два масиви сонячних батарей до одного інвертора.

Результати розрахунку енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів України приведено в табл. 4.1. В даній таблиці приведено розраховану електроенергію  $E_{CB}$ , генерованої однією сонячною батареєю типу KVazar KV 250M за рік. Для розрахунку генерованої електроенергії було використано дані NASA [109] про густину потоку сонячного випромінювання на території України. Необхідну кількість СБ розраховували по даних табл. 1.2 про спожиту електроенергію зовнішнім освітленням. Також в табл. 4.1 представлено енергетичну потужність  $W_{AKB}$  необхідну для забезпечення автономного живлення зовнішнього освітлення населених пунктів. Розрахунок енергетичної потужності проводився для акумуляторних батарей з номінальною напругою  $U_{AKB}=48$  В. Для розрахунку необхідну кількість АКБ було вибрано Li-ion акумулятори типу LP48100ES з номінальною напругою 48 В та ємністю 100 А·год. Також було проведено розрахунок вартості СБ, та акумуляторних батарей, які приведені в табл. 4.1. Ціна однієї сонячної батареї становило 7500 грн і однієї акумуляторної батареї 9500 грн.

Таблиця 4.1

Параметри сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів України

Адміністративно-територіальний поділ	$E_{CB}$ , кВт·год	$N_{CB}$ , шт.	$W_{AKB}$ , тис. кВт·год ( $U_{AKB}=48$ В)	$n_{AKB}$ , шт.	Ціна СБ тис.грн	Ціна АКБ тис.грн.
Вінницька	283	55265	19526	197233	436597	1873718
Волинська	272	28034	9523	96189	221471	913799
Дніпропетровська	305	124180	47402	478806	981025	4548655

Продовження таблиці 4.1

Адміністративно-територіальний поділ	$E_{CB}$ , $кВт\cdot год$	$N_{CB}$ , шт.	$W_{AKB}$ , тис. $кВт\cdot год$ ( $U_{AKB}=48 В$ )	$n_{AKB}$ , шт.	Ціна СБ тис.грн	Ціна АКБ тис.грн.
Донецька	304	91886	34866	352180	725902	3345707
Житомирська	276	25882	8939	90290	204469	857759
Закарпатська	268	49667	16645	168134	392369	1597276
Запорізька	313	68297	26691	269605	539547	2561246
Івано-Франківська	267	37132	12402	125274	293342	1190107
Київська	282	143049	50379	508876	1130084	4834324
Кіровоградська	300	33889	12705	128334	267724	1219170
Луганська	304	13450	5104	51551	106254	489730
Львівська	265	153879	51046	515619	1215643	4898380
Миколаївська	323	56375	22736	229659	445364	2181761
Одеська	323	141559	57091	576677	1118315	5478429
Полтавська	295	42657	15750	159091	336994	1511364
Рівненська	274	53096	18156	183397	419456	1742275
Сумська	287	59624	21405	216211	471032	2054003
Тернопільська	272	24874	8449	85345	196503	810781
Харківська	296	162182	60065	606717	1281235	5763813
Херсонська	323	26469	10675	107828	209105	1024369
Хмельницька	278	59036	20523	207301	466381	1969363
Черкаська	294	60052	22104	223275	474411	2121111
Чернівецька	275	29008	9985	100861	229161	958181
Чернігівська	267	23890	7979	80598	188729	765686
м.Київ	282	216676	76309	770795	1711739	7322557

#### **4.2. Техніко-економічний розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів**

Для техніко-економічного розрахунку ОУ зовнішнього освітлення було вибрано: міста з населенням близько 1 млн. і більше та міста з населенням 200-300 тисяч (обласні центри). Також окрему увагу приділено населеним пунктам сільської місцевості, в більшості яких на даний час повністю відсутнє зовнішнє освітлення.

Для прикладу було взято м.Київ з населенням 2.8 млн. та м.Тернопіль з населенням 218 тисяч. Було проведено два типи техніко-економічного розрахунку. Перший тип забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Надлишки електроенергії протягом весняно-літніх місяців будуть віддаватися в мережу. Другий тип - забезпечує автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців, а при нестачі енергії в зимовий період буде братися з мережі. Для цього використано методику розрахунку сонячних енергетичних установок неведену у розділі 4.1 і отримані аналітичні залежності з врахуванням кліматичних умов.

Результати розрахунку для м. Києва приведені в табл. 4.2. Для I-го типу енергетичної установки потрібно 448397 сонячних батарей, 4671 інверторів, 45848 акумуляторів і 3737 монтажних комплектуючих. Для реалізації даної системи електропостачання зовнішнього освітлення необхідно 5165 *млн. грн.* Для II-го типу необхідно 165105 сонячних батарей, 1720 інверторів, 45848 акумуляторів, 1376 монтажних комплектуючих і загальна вартість становить 2177 *млн. грн.*

Таблиця 4.2

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Києва

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. <i>тис. грн.</i>	Кількість шт.	Ціна <i>тис.грн.</i>
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	448397	3542336,3
	II – тип		165105	1304329,5
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	4671	513810,0
	II – тип		1720	189200,0
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	45848	435556,0
	II – тип		45848	435556,0
Монтажні комплектуючі для установки сонячних батарей на землю	I - тип	180	3737	672660,0
	II – тип		1376	247680,0
Всього:	I - тип			<b>5164363</b>
	II – тип			<b>2176766</b>

Такий же техніко-економічний розрахунок було проведено для м.Тернополя, який наведено у табл. 4.3. Для комплектації першого типу електростанції буде потрібно 390 *млн. грн.*, а для другого типу - 164 *млн. грн.* В даних розрахунках не враховані затрати на монтаж, релейний захист, трансформаторні підстанції та подальшу експлуатацію кожної із енергетичних систем.

Таблиця 4.3

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Тернополя

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	33823	267201,7
	II – тип		12454	98386,6
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	353	38830,0
	II – тип		130	14300,0
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	3459	32860,5
	II – тип		3459	32860,5
Монтажні комплектуючі для установки сонячних батарей на землю	I - тип	180	282	50760,0
	II – тип		104	18720,00
Всього:	I - тип			389652
	II – тип			164267

Легко видно, що сонячні енергетичні установки, розраховані на основі енергетичних потреб, як окремих областей, так і великих міст, вимагають великих затрат і можуть бути впровадженні в далекому майбутньому. Тому для розрахунків було взято середньостатистичні дані спожитої електроенергії на зовнішнє освітлення населених пунктів з населенням 5000-20000 осіб. Для прикладу було взяти районні центри Тернопільської обл. Дані приведені в табл. 4.4.

За даними кількості світлоточок та спожитої електроенергії було проведено розрахунок середнього значення споживання однією світлоточкою в Тернопільській області (табл. 1.4). В табл. 4.4 приведені дані про кількість



спожитої електроенергії зовнішнім освітленням  $W$ , як помісячно, так і протягом 2016 року в районних центрах Тернопільської області.

Таблиця 4.4

Показники зовнішнього освітлення районних центрів Тернопільської області за 2016 рік

Місяць	Ланівці $W, кВт \cdot год$	Монастиришк $W, кВт \cdot год$	Теребовля $W, кВт \cdot год$	Шумськ $W, кВт \cdot год$	Бучач $W, кВт \cdot год$	Підволочиськ $W, кВт \cdot год$	Кременець $W, кВт \cdot год$	Козова $W$ , $кВт \cdot год$	Бережани $W, кВт \cdot год$
Січень	6900	7622	6879	12488	27250	20227	4265	14400	19100
Лютий	6500	7600	9389	10856	26170	19041	10239	12180	18200
Березень	5900	6227	7675	8559	19406	14011	8388	10720	16400
Квітень	5600	5724	7885	11880	17772	11248	10987	7810	10234
Травень	5400	4057	7639	7237	14536	10959	11668	6800	10230
Червень	5200	3230	4809	5493	13208	9229	8059	6700	10100
Липень	5000	2927	6339	5263	12651	8723	6692	6500	10030
Серпень	5000	3287	5505	5440	13267	9406	6641	6500	11100
Вересень	5000	4441	5813	8855	13859	8575	10202	6800	12500
Жовтень	5900	5247	10608	8385	21283	12199	13665	7200	18200
Листопад	6500	6774	10701	8939	23690	11527	4670	8400	19200
Грудень	7100	7590	11004	9500	26560	13000	3816	12200	19300
Всього за рік	70000	64726	94246	102895	229652	148145	99292	106210	174594
Кількість населення	8700	5887	13595	5453	12550	7985	21388	9194	18168
Кількість світлоточок	342	316	460	502	1121	883	485	522	1514

Для знаходження зв'язку між спожитою електроенергією, зовнішнім освітленням та кількістю світлоточок була побудована графічна залежність для вказаних в табл. 4.4 вибраних обласних населених пунктів, яка приведена на рис. 4.2.

Обробку та розрахунок результатів проводили з використанням програмного середовища Microsoft Excel і усереднення даних методом найменших квадратів. В результаті були отримані аналітичні залежності, що описуються рівнянням:

$$W = 53842e^{0,146 N}, \quad (4.6)$$

де  $W$  – енергія, спожита зовнішнім освітленням протягом року ( $\text{кВт}\cdot\text{год}$ );

$N$  – кількість світлоточок.

Коефіцієнт кореляції даного рівняння  $R^2 = 0,9399$ .

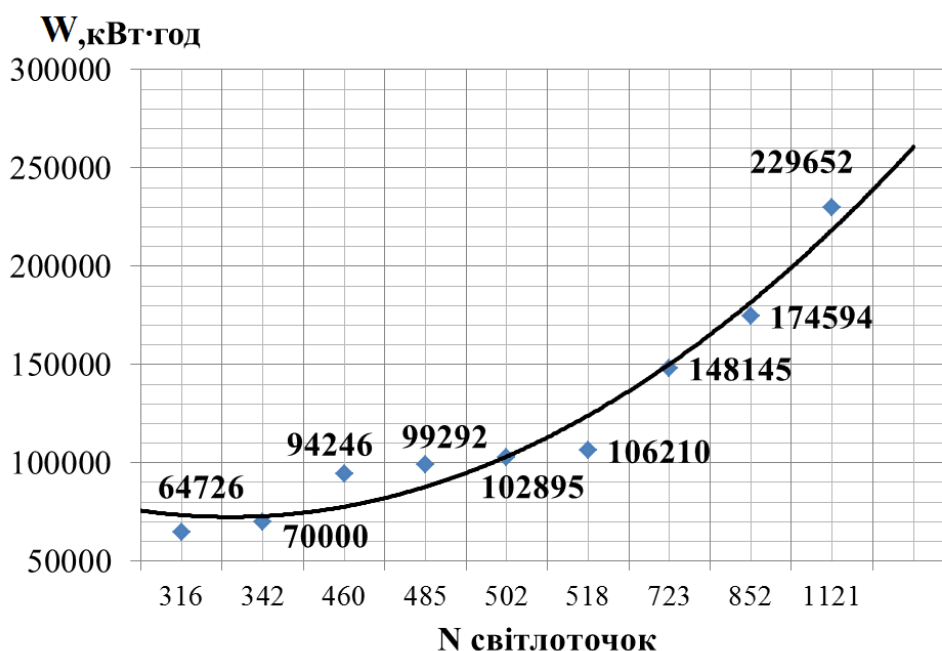


Рис. 4.2. Залежність енергії, спожитої зовнішнім освітленням  $W$ , від кількості світлоточок  $N$  для різних районних центрів Тернопільської області

На прикладі районного центра Ланівці з населенням 8,7 тис. було розраховано два типи сонячних енергетичних установок, які базувалися:

I – на енергії сонячного випромінювання протягом осінньо-зимового періоду; II – протягом весняно-літнього періоду.

З табл. 4.5 видно, що для I-го типу, який забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період, потрібно 635 сонячних батарей, 7 інверторів, 65 акумуляторів і 6 монтажних комплектуючих. Для реалізації даної системи електропостачання зовнішнього освітлення необхідно 7,5 млн.грн. Для II-го типу, який забезпечує автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяці необхідно 234 сонячних батарей, 3 інверторів, 654 акумуляторів, 2 монтажних комплектуючих і загальна вартість становить 3,2 млн.грн.

Таблиця 4.5

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Ланівці з населенням 8,7 тис

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	635	5016,5
	II – тип		234	1848,6
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	7	770,0
	II – тип		3	330,0
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	65	617,5
	II – тип		65	617,5
Монтажні комплектуючі для установки сонячних батарей на землю	I - тип	180	6	1080,0
	II – тип		2	360,0
Всього:	I - тип			7484
	II – тип			3156

#### 4.3. Світлотехнічний розрахунок ОУ з автономним живленням

Для практичної реалізації ОУ з автономним живленням було вибрано установку зовнішнього освітлення території навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І.Пуллюя. Територія, яку потрібно було освітити займає площу  $800 \text{ м}^2$  і складається з паркувальної території площею  $400 \text{ м}^2$  та пішохідної доріжки довжиною  $65 \text{ м}$  і площею  $400 \text{ м}^2$ .

Розрахунок ОУ розпочинався з вибору світлових приладів, оскільки вони є однією з основних частин освітлювальної установки з автономним живленням для освітлення міст, доріг, пішохідних доріжок, а їх вартість є однією із складових вартості установок. Виходили із того, що конструкція СП повинна забезпечувати тривалий час експлуатації без суттєвих зміни їх світлотехнічних параметрів, найменшій вартості обслуговування, надійності в роботі. Враховуючи це, для освітлення території були вибрані СП типу ДСУ05У-25-1-325 [108]. При розрахунку виходили із умов, що згідно ДБН В.2.5-28-2006 дана установка повинна забезпечувати мінімальний рівень освітлення  $4 \text{ лк}$  [106]. Розподіл освітлення та розташування світлових приладів приведено на рис. 4.3, 4.4. На рис. 4.5 показано 3Д зображення освітлювальної території з розташуванням СП. Розрахунок ОУ здійснювався в пакеті DiaLux [107].

Розподілу освітленості для пішохідної доріжки представлено на рис. 4.3. Тут розташовано 3-ри світлові прилади, відстань між ними становить  $25 \text{ м}$ . Освітлення від них змінюється в межах  $4\text{-}14 \text{ лк}$ .

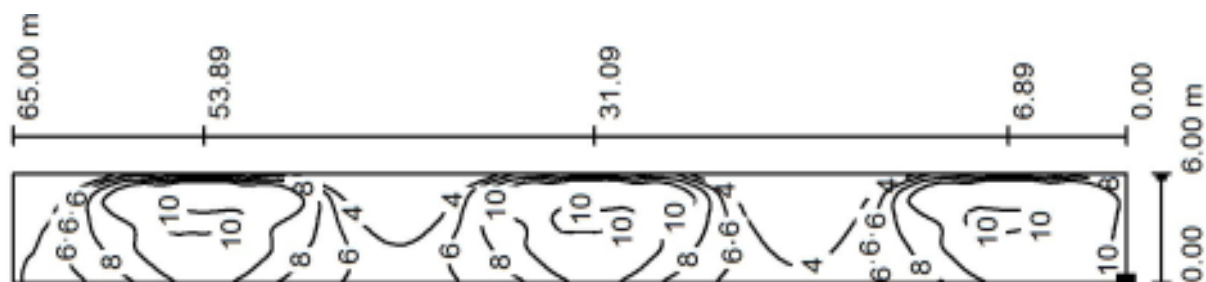


Рис. 4.3. Розподіл освітленості пішохідної доріжки

Розподілу освітленості для паркувальної території представлено на рис. 4.4. Як видно з результатів розрахунку паркувальної площадки мінімальна освітленість становить 8 лк, а максимальна 10 лк.

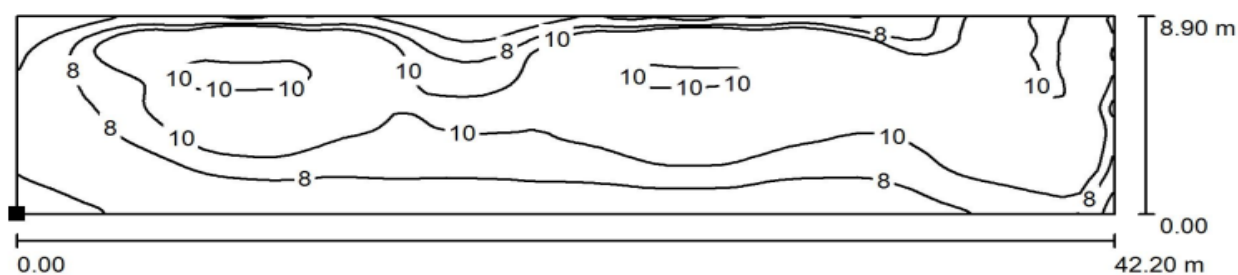


Рис. 4.4. Розподіл освітленості паркувальної площадки

На основі проведених розрахунків освітлювальної установки, а також її розміщення, було отримано, що її світлотехнічні параметри задовільняють вимоги ДБН щодо забезпечення належного рівня освітленості та яскравості. Таким чином для освітлення даної території необхідно п'ять світлових приладів, загальною потужністю 125 Вт.

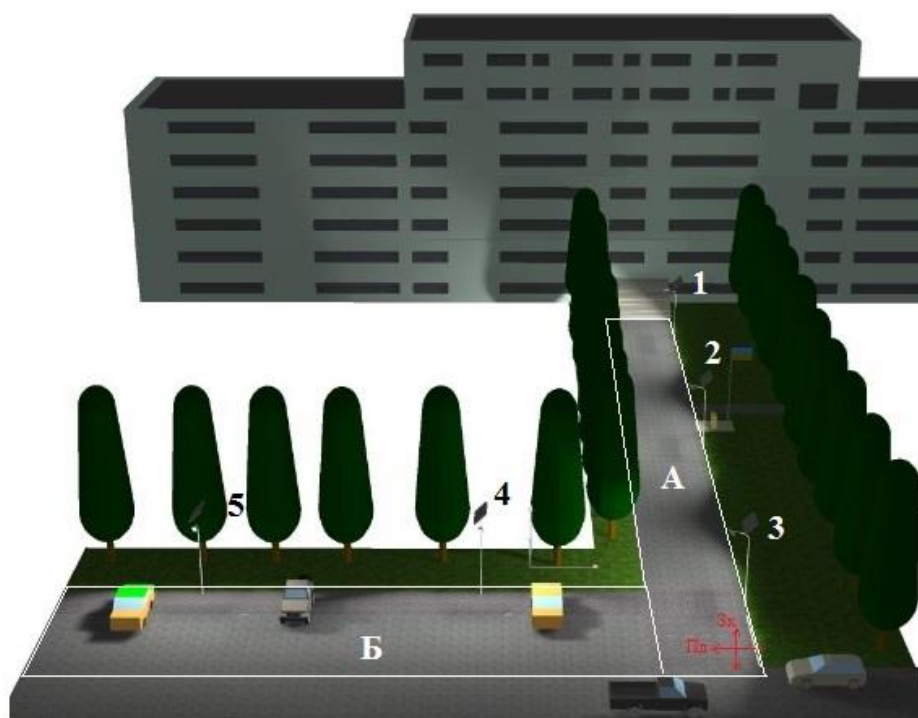


Рис. 4.5. 3D зображення освітлення території навчального корпусу №7, де: 1 – СП №1; 2 – СП №2; 3 – СП №3; 4 – СП №4; 5 – СП №5;  
А- пішохідна доріжка; Б - паркувальна територія

#### **4.4. Аналіз ефективності роботи автономної енергетичної установки для зовнішнього освітлення**

Перед тим як перейти до вибору конфігурації світловий прилад – сонячна батарея було проведено аудит потоку сонячної енергії в місцях розташування світлових приладів з блоками автономного живлення (рис. 4.5). Аудит потоку сонячної енергії проводився протягом 29 травня 2018 року. Було виявлено, що СП № 4,5 були освітленні до  $13^{00}$ , №1 до  $15^{00}$ , №2 до  $17^{00}$ , а №3 був освітлений на протязі всього світлового дня. Даний аудит дав змогу оцінити ефективність та місце розташування СБ. Поряд з аудитом проводилося вимірювання густини потоку сонячного випромінювання за допомогою установки, яка описана в розділі 3.1. Дослідження проводили для освітлювальної установки №4. Результат представлено на рис. 4.6.

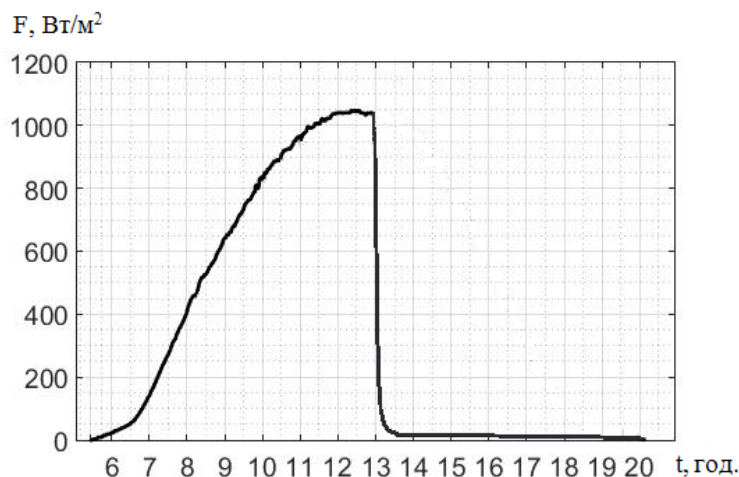


Рис. 4.6. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання впродовж доби для СП №4 і 5

Як видно з графіка густини потоку сонячного випромінювання, до 13<sup>00</sup> год. відбувається поступове зростання сонячного випромінювання до 1050 Вт/м². Після 13<sup>00</sup> год. спостерігається різкий спад до 35 Вт/м². Це зумовлено затіненням фотодатчика і попаданням лише розсіяного сонячного випромінювання. Аналогічні графіки спостерігалися для СП № 1 і 2, але час їх освітлення тривав до 15<sup>00</sup> год. Було виявлено, що СП №3 був освітлений на протязі всього світлового дня.

На основі проведеного аудиту було розглянуто два варіанти виконання автономного живлення освітлювальної установки на основі сонячних батарей. Перший тип – розміщення СБ на кожній опорі окремо. Другий тип – розміщення СБ в найбільш сприятливому місці на опорі №3, а живлення інших СП здійснювати по кабельній лінії. В даному типі установки систему керування та блок акумуляторів можна розташувати в спеціальному боксі або в приміщенні навчального корпусу. Такий варіант виконання пов'язаний із затіненням ОУ і низькою ефективністю автономного живлення освітлювальної установки.

При розрахунку автономної установки II типу сумарна потужність п'яти СП становить 125 Вт [108], найтриваліший час роботи в грудні становить 15 годин, максимальне споживання енергії при самому тривалому часі роботи складе

1875  $Bm \cdot год$  на добу. Таким чином, при сумарній енергії прожекторів 1875  $Bm \cdot год$  на добу, а допустима глибина розряду АКБ 24 В – 80 %, ємність становить  $C=100 A \cdot год$ . Використання датчиків руху в поєднанні з пристроєм регулювання світлового потоку СП на основі ШІ-модуляції, дозволить в середньому на 50 % зменшити споживання енергії від акумуляторної батареї. Тому було взято 5 паралельно з'єднаних Li-ion акумуляторних батарей типу Li-ion 24V10A загальною ємністю  $C = 50 A \cdot год$ , номінальною напругою 24 В. Також для прикладу було взято 5 паралельно з'єднаних батарей суперконденсаторів типу SM-24V-200FUS номінальною напругою 24 В та загальною ємністю 1000 Ф.

Розрахунок сонячних батарей було проведено для осінньо-зимового періоду з врахуванням середньої густини сонячної енергії для грудня 2017 р.. Необхідну потужність сонячної батареї  $P_{CB}$  розраховували за формулою:

$$P_{CB} = (E_{AKB} \cdot E_{ном}) / (E_{сер} \cdot \mu_b), \quad (4.7)$$

де  $E_{AKB}$  – енергія, необхідна для повного заряду АКБ;

$E_{ном}$  – номінальне значення енергії сонячного випромінювання ( $1000 Bm/m^2$ );

$E_{сер}$  – середньодобове значення енергії сонячного випромінювання.

Для ОУ з автономним живленням розрахована потужність СБ становить 1250  $Bm$ . Для даної установки було використано 5 – сонячних батарей типу KVazar KV 250M. З'єднавши дані сонячні батареї паралельно, було отримано наступні параметри: номінальна потужність 1250  $Bm$ , робоча поверхня 8,3  $m^2$ , напруга при максимальній потужності 30,5 В, напруга холостого ходу 37,1 В і струм при максимальній потужності 40,5 А [101]. Для даної сонячної батареї було використано систему керування на основі контролера типу ТА\_СМ5024Z.

Аналогічно було проведено техніко-економічний розрахунок для II-го типу, коли СБ розташовані на кожній опорі з врахуванням густини енергії сонячного випромінювання для кожної сонячної батареї.



В табл. 4.6 представлено техніко-економічний розрахунок двох типів освітлювальної установки з автономним живленням для освітлення прилеглої території навчального корпусу №7, а саме пішохідної алеї та паркувальної площадки.

Таблиця 4.6

Техніко-економічний розрахунок автономного освітлення навчального корпусу №7

Назва обладнання	Тип автономної установки	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	8,3	9	74,7
	II – тип		5	41,5
Контролер ТА_СМ2024Z	I - тип	0,8	5	4
Контролер ТА_СМ5024Z	II – тип	2	1	2
Li-ion акумулятори 24 В, 10 А·год	I - тип	4,6	5	23
	II – тип		5	23
Суперконденсатори SM-24V-200FUS 15 Вт · год	I - тип	11,2	5	56
	II – тип		5	56
Монтажні комплектуючі	I - тип	1,5	5	7,5
	II – тип		1	1,5
Датчик руху	I - тип	0,3	5	1,5
	II – тип		5	1,5
Всього:	I – тип з Li-ion акумуляторами			<b>110,7</b>
	II – тип з Li-ion акумуляторами			<b>69,5</b>
	I – тип з суперконденсаторами			<b>143,7</b>
	II – тип з суперконденсаторами			<b>102,5</b>

Враховуючи енергоефективні умови розташування сонячних батарей, було використано другий варіант системи автономного живлення. Він дозволив використати одну систему кріплення СБ, систему керування та блок акумуляторів, які були розташовані в спеціально виконаному антивандальному

боксі. З табл. 4.5 видно, що для реалізації автономної системи освітлення I-го типу потрібно 110,7 тис. грн. Для II-го загальна вартість становить 69,5 тис. грн.

### **Висновки**

1. Наведено методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Запропоновано два типи сонячних енергетичних установок. Перший тип повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Другий тип буде забезпечувати автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців.

2. Представлено аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання по областях України та проведено аналіз енергії, спожитої зовнішнім освітленням районних центрів Тернопільської області. Отримано залежності енергії, спожитої зовнішнім освітленням, від кількості світлоточок для різних населених пунктів Тернопільської області.

3. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення м.Київ з населенням 2.8 млн. та м. Тернопіль з населенням 218 тисяч та м. Ланівці з населенням 8,7 тис.

4. Представлено техніко-економічний розрахунок ОУ з автономним живленням для зовнішнього освітлення території корпусу №7 ТНТУ ім. І.Пуллюя. Проведено аналіз енергетичної ефективності установки і показано, що для освітлення даної території доцільно використати другий варіант конфігурації сонячна батарея – світловий прилад коли, система автономного живлення розташована в найбільш освітленому місці і для неї використати одну систему кріплення СБ, систему керування та блок акумуляторів, які можуть бути розташовані у спеціально виконаному антивандальному боксі, або приміщенні навчального корпусу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання фотоелектричних характеристик СБ. Запропонована модель сонячного елемента. Експериментально визначено параметри даної моделі для СБ типу ALM-50M. Проведено моделювання впливу коефіцієнта ідеальності діода і зворотнього струму насичення діода на  $U_{xx}$ . Показано, що при збільшенні струмів насичення діода від  $I_0=4 \text{ мкА}$  до  $I_0=40 \text{ мкА}$  відбувається зменшення  $U_{xx}$  від 21,6 до 19 В, що в свою чергу знижує вихідну потужність.

2. В якості акумулюючої системи автономного джерела живлення ОУ запропоновано батарею із суперконденсаторів. Встановлено лінійну залежність ємності СК від напруги зарядки. Проведено вимірювання внутрішнього опору вибірки суперконденсаторів, середнє значення якого  $R_{вн} \approx 11 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$  і його відхилення для різних напруг зарядки не перевищувало 5 %. Встановлено, що після заряду суперконденсаторів до їх номінальної напруги 2,7 В із збільшенням тривалості їх витримки при цій нарузі від 5 хв. до 360 хв. збільшується час їх саморозряду від  $0,3 \cdot 10^4$  до  $2,4 \cdot 10^4$  с.

3. Запропоновано систему регулювання процесів заряду/розряду суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів з використанням пристрою балансування напруги на окремих їх елементах (Патент на корисну модель №116216).

4. Запропоновано методику, змонтовано експериментальну установку та проведено вимірювання і запис густини потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу на широті м. Тернополя. Проведено розрахунок часового розподілу густини енергетичного потоку сонячного випромінювання, та визначено кількість енергії сонячного випромінювання протягом кожного місяця 2016-2017 років.

5. Проведено аналіз впливу кліматичних умов протягом кожного місяця 2016-2017 рр. на густину потоку сонячного випромінювання. Встановлено

аналітичну залежність середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності  $E(N)$  протягом кожного місяця.

6. На основі встановлених аналітичних залежностей проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання протягом 2012 – 2016 років західного регіону України. Визначено, що середньорічна густина потоку сонячної енергії становить  $1045,9 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ , а її відхилення не перевищує 5 %.

7. Наведено методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Запропоновано два типи сонячних енергетичних установок. Перший тип повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Другий тип буде забезпечувати автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців.

8. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення м. Київ з населенням 2.8 млн. та м. Тернопіль з населенням 218 тисяч та м. Ланівці з населенням 8,7 тис.

9. Представлено розрахунок енергетичної ефективності ОУ з автономним живленням для зовнішнього освітлення території корпусу №7 ТНТУ ім. І.Пулюя. Показано, що для освітлення даної території доцільно використати систему автономного живлення, розташовану в найбільш освітленому місці, для якої необхідно використати одну систему кріплення СБ, систему керування та блок акумуляторів, які можуть бути розташовані у спеціально виконаному антивандальному боксі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, В.Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Т. 22. – №. 2. – С. 141-157.
2. Воронин, С.М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение / С.М. Воронин, С.В. Оськин, А.Н. Головки. – Краснодар, 2006. – С. 267.
3. Андреев В.М. Нанотехнологии для солнечной фотоэнергетики / В.М.Андреев // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – №2 (46). – С.93-98.
4. Наумов А.В. Перспективы рынка поликристаллического кремния / А.В. Наумов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2014. – Т. 17. – №4. – С. 233 - 239.
5. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні за 2017 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://minregion.gov.ua>.
6. Інтегрований вуличний світильник Shenzhen [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.shinehui.com/en/products\\_list.php?prid1=21](http://www.shinehui.com/en/products_list.php?prid1=21).
7. Уличные світильники SunShines [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sun-shines.ru/product/street-light>.
8. Фотоэлектрические установки EPS-Soltec [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eps-soltec.com/en/produkte/strasen-wege-undplatzbeleuchtung>.
9. Чумакевич В.О. Обґрунтування можливості освітлення парків в місцях постійної дислокації за допомогою сонячних батарей у львівській області / В. О. Чумакевич, В. В. Атаманюк, І. В. Пулеко, А. М. Дубовський // Військово-технічний збірник. – 2015. – № 13. – С. 102-105.

10. Пастушенко М.С. Перспективы внедрения возобновляемых источников электрической энергии на железнодорожном транспорте Украины // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 12. – С. 45 - 51.
11. Сурков М.А., Сумарокова Л.П. Оценка возможности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения уличного освещения в климатических условиях Сибири / М.А. Сурков, Л.П. Сумарокова // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Том 8. – №6.
12. Четошникова Л.М., Применение автономных систем освещения на базе солнечных модулей для парковых зон / Четошникова Л.М., Гуськова А.И. // ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК – 2013. – № 4-2. – С.205-209.
13. Литвиненко А.С. Автономная система освещения гибридного типа / А.С. Литвиненко, О.М. Діденко, Ю.О. Васильева, Л.Д. Гуракова, К.І. Іоффе // Светотехника и электроэнергетика. – 2016. – №1. – С. 12-18.
14. Арапов А. Перспективы развития солнечной энергетики в Украине, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.zamnoy.com/blogs/aleksey\\_arapov/114057145/2012-06-15/aine](http://www.zamnoy.com/blogs/aleksey_arapov/114057145/2012-06-15/aine).
15. Григораш, О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю.И. Стрелков // Промышленная энергетика, №4. – 2001. – С. 37-40.
16. Евстафьев В.А., Майкова О.В Автономный светодиодный уличный фонарь // XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». – 2013. – С.41-42.
17. Nazarenko L.A. Gologrammnye koncentratory dlya solnechnykh batarej fotoelektricheskikh ustanovok / L. A. Nazarenko, A. S. Litvinenko, V. P. Kostylev // Materiali 4-oї mizhnarodnoї naukovo - texnichnoї konferencії „Suchasni problemi svitlotexniki ta elektroenergetika”. – 2011. – pp. 166-168.
18. Назаренко Л.А. Солнечные энергетические установки с голограммными концентраторами энергии / Л.А. Назаренко, А.С. Литвиненко // Светотехника и электроэнергетика. – 2010. – № 3-4. – pp. 21 25.

19. Андреев С.В. Солнечные электростанции / С.В. Андреев // – М.: Наука 2002.
20. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – pp.256-263.
21. Базилевский, А.Б. Идентификация модели солнечной батареи / А.Б. Базилевский, М.В. Лукьяненко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф.Решетнева. – 2007. – №4. – С. 115-117с.
22. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина Н.М. Альтернативные Энергоносители. // – М.: Наука, 2004.
23. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие. // – М.: ВШ, 2005.
24. Ермолова Н.С., Моураов А.Г. Возобновляемые источники энергии: новые технологии использования солнечной энергии // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XVI-XVII междунар. науч.-практ. конф. – 2014. – № 9-10(16).
25. Владимир Гуревич Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия, применение // Силовая электроника. – 2012. – № 5.
26. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей з акумулюючими елементами / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, В.П. Коваль/ // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року. – Т. : ТНТУ, 2015. – С. 185-186.
27. Шембель О.М., Білогуров В.А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем / О.М. Шембель, В.А. Білогуров // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. – 2009. – № 2(17). – С. 66-86.

28. Гаврилко П.П. Розвиток та впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах України / П.П. Гаврилко, Р.С. Чорний, Я.В. Шевчук // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – Том 2. – №10. – С. 66-71.

29. Рыкованов А.С. Li-ion аккумуляторные батареи с внешней системой баланса / А.С. Рыкованов // Силовая электроника. – 2012. – № 6.

30. Рыкованов А.С. Системы обеспечения функционирования Li-ion аккумуляторных батарей. Структуры и принципы построения / А.С. Рыкованов // Силовая электроника. – 2012. – № 5.

31. Nema S. K., Nema R. K., Agnihorti G. A.: Int. J. Energy and Environment. – 2010. – No. 1. – P. 487.

32. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їхніх початкових і кінцевих напруг / О.О. Білецький, Н.І. Супруновська, А.А. Щерба // Техн. Електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 3-10.

33. Изотов В.Ю., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатори / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин // Наук. вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 6. – С. 114-118.

34. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба // Техн.електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3-11.

35. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторів / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, Д.С. Иващенко, О.А. Белецкий // Техн.електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3-11.

36. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемы еисточники энергии. / Дж. Твайделл, А. Уэйр // – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – С. 390.

37. Щерба А.А., Супруновська Н.І. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных



значений. / А.А. Щерба, Н.І. Супруновська // Техн. електродинаміка. – 2012 – № 5. – С. 3-9.

38. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / A. Burke // Proc. of the IEEE. – 2007. – V. 95. – No. 4. – P. 806-820.

39. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / A. Burke, M. Miller // Journ. of the Power Sources Issue. 1, January 2011. – Vol. 196. – P. 514-522.

40. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / A. Burke, M. Miller, H. Zhao // Research Report. – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California. – May 2012.

41. Burke A., Zhao H. Application of supercapacitors in electric and hybrid vehicles / A. Burke, H. Zhao // Research Report. – UCD-ITS-RR-15-09. – Institute of Transportation Studies. University of California. – 2015.

42. Green-Cap (ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITORS). – Available online at: <http://www.masters.com.pl/files/ds/samwha/samwha-green-cap.pdf>.

43. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids / O.M. Ivanova, M.I. Danylenko, G.E. Monastyrskyy, V.I. Kolomytsev, Y.M. Koval, A.A. Shcherba, S.M. Zaharchenko, R. Portier. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2009. – T.31. – No 5. – Pp. 603-614.

44. Kurzweil P., Frenzel B. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors / P. Kurzweil, B. Frenzel. // Proc. the 15<sup>th</sup> International seminar on double layer capacitors. – Deerfield Beach, Fl., U.S.A., December 5-7 2005.

45. Maletin Y. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles / N. Stryzhakova, S. Zelinskyi, S. Chernukhin, D. Tretyakov, H. Mosqueda, N. Davydenko, and D. Drobnyi. // Journ. of Energy and Power Engineering. – 2015. – No. 9. – P. 585–591.

46. Mihailescu B., Svasta P., Varzaru G. Hybrid Supercapacitor - Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / B. Mihailescu, P. Svasta, G. Varzaru. // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C.– 2013. – Vol. 75. – Iss. 2. – P. 277–290.
47. Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon. // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 165. – No. 2. – P. 928-934.
48. Roedem B. Thin - film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / B. Roedem // Refocus.– 2006. –Vol. 7. –No 4.–Pp. 34-39.
49. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / L. Zubieta, R. Bonert // IEEE Trans. On Industry Applications. – January-February 2000. – Vol. 36. – No. 1. – P. 199-205.
50. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням // V Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 23-27 лютого 2015 року. – Т. : ТНТУ, 2015. – С. 115-116.
51. Контролер заряду JUTA 50A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers\\_solar\\_panels/manual\\_JUTA\\_CM5024Z.pdf](http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers_solar_panels/manual_JUTA_CM5024Z.pdf).
52. Контролер заряду JUTA 30A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers\\_solar\\_panels/manual\\_JUTA\\_CM3024Z.pdf](http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers_solar_panels/manual_JUTA_CM3024Z.pdf).
53. Контролер заряду JUTA 10A [Електронний ресурс]. – Режим доступу :[http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers\\_solar\\_panels/manual\\_JUTA\\_CM2024Z.pdf](http://www.altcentr.ru/upload/instruktions/kontrollers_solar_panels/manual_JUTA_CM2024Z.pdf).
54. Контроллер заряда WINCONG PWM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://realsolar.ru/wp-content/uploads/2013/05/wincong-10-20-30A\\_war.pdf](http://realsolar.ru/wp-content/uploads/2013/05/wincong-10-20-30A_war.pdf).

55. Контролери заряду для сонячних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.solbat.su/dopobr/kontzar/>.
56. Placko D. Fundamentals of Instrumentation and Measurement. / D. Placko // London: ISTE Ltd. – 2007. – p. 532.
57. Scott J. Pulsed device measurements and applications / J.Scott, J.Rathmell, A.Parker, M. Sayed // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996. – Vol. 44. – №12. – p. 2718-2723.
58. Baylis C. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements / C. Baylis, L. Dunleavy // High Frequency Electronics. – 2004. – Vol. 3, №5. – p. 64-69.
59. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization /P. Hulbert // Keithley whitepaper. – 2008. – Vol. 9. – p.1-5.
60. Parker A. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements / A. Parker, J. Scott, J. Rathmell, M. Sayed // IEEE MTT-S International Symposium Digest. – San Francisco. – 1996. – p. 1707-1710.
61. Keithley Instruments. Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.keithley.com/data?asset=50323>.
62. Keithley Instruments. Wafer Level Reliability Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.keithley.com/data?asset=52574>"[www.keithley.com/data?asset=52574](http://www.keithley.com/data?asset=52574).
63. Rathmell J. Characterizing charge trapping in microwave transistors / J.Rathmell, A. Parker // SPIE Proceedings. Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II. – 2006. – Vol. 6035. – p. 1-9.
64. Дойников Д. С. Спектральные характеристики излучения трубчатых ксеноновых импульсных и дуговых ламп; Обзоры по электронной технике. // М.: ЦНИИ «Электроника». – 1973. – вып. 11 (154). – С. 29.
65. Проценко Г.Д. Метеорологія та кліматологія: Навчальний посібник. // – К. 2007.

66. Solar Power MeterDT-1307 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cem-instruments.in/product.php?pname=DT-1307>.
67. Switching DC Power Supply [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.longweielec.com/lw-k3010d/>
68. Філюк Я.О., Андрійчук В.А. Система автономного питания внешнего освещения / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Светотехника и электроэнергетика. – 2017. – №1. – С. 17-22.
69. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна / А. Фаренбрух, Р. Бьюб // – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – С. 280.
70. Евдокимов В.М. Расчет последовательного и шунтирующего сопротивлений по вольтамперной характеристике солнечного элемента / В.М. Евдокимов // Гелиотехника, 1972. – №6. – С. 16-22.
71. Коваль О.С., Тиванов М.С. Определение параметров солнечного элемента из его световой вольт-амперной характеристики / О.С. Коваль, М.С. Тиванов // Вестник БГУ, 2012. – Сер. 1. – № 2. – С. 39-44.
72. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах; пер. с англ. // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 360.
73. Глиberman, А.Я. Кремниевые солнечные батареи / А.Я. Глиberman, А.К. Зайцева. // – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961г. – С. 72.
74. Li Z., Chen J. “An impedance-based approach to predict the state-of-charge for carbon-based supercapacitors”. / Z. Li, J. Chen // Microelectronic Engineering. – No. 85. – pp. 1549-1554.
75. Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems. / M. Gilbert // John Wiley & Sons Publishing, New Jersey, 2004.
76. Paulescu M. Algoritmi de estimare a energiei solare, Matrix ROM. / M. Paulescu // Bucuresti, 2005.
77. Zekai Sen, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. / Sen Zekai // Springer, 2008.

78. Мейтин М. Пусть всегда будет солнце / М. Мейтин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2000. – С.40-46.
79. Kuznicki Z.T., Multiinterfase Solar Cells I. Limits, Modeling, Desing // First Polish-Ukrainian Symposium “New Photovoltaic Materials for Solar Cells”, E-MRS, Krakow (Poland), 1996. – pp. 58-78.
80. Гарифулина М.Р., Власов Ф.И., Макарчук В.В., Адамович Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS 77-4821/479044. / М.Р. Гарифулина, Ф.И. Власов, В.В. Макарчук, Н. Адамович // Инженерный весник МГТИ им. Н.Э.Баумана. – 2012. – №8. – С.1-21.
81. Livingston W., Wallace L., White O.R., and Giampapa M. S. Sun-as-a-Star Spectrum Variations 1974-2006 / W. Livingston, L. Wallace, O.R. White, and M.S. Giampapa // Astrophysical Journal. – 2007. – Vol. 657. – P. 1137-1149.
82. Філюк Я.О. Використання суперконденсаторів для автономного живлення установок із світлодіодними джерелами світла / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, А.Р. Малюга // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17 листопада 2016 року — Т.: ТНТУ. — С. 202-203.
83. Філюк Я. О. Освітлювальні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей та іоністорів / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій, 25 листопада 2015 року — Т.: ТНТУ. – С. 129-130.
84. Filyuk Y.O. Lighting installation autonomous power systems / V.P. Koval, Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // ICEPOM-10 CONFERENCE ABSTRACTS: зб. тез доповідей X міжнародної конференції ICEPOM-10, Тернопіль, 23-27 травня 2016 року. – С. 54.
85. Філюк Я.О., Андрійчук В.А. Акумуляуючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 40-47.

86. Пат. №116216 Україна : МПК (2017.01) H02J 7/00. Прилад балансування напруги на окремому суперконденсаторі акумулюючої батареї від перезаряду / Філюк Я.О., Андрійчук В.А., Липовецький М.М; заявник і патентоотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № 201612215; заявл.01.12.2016 ; опублік. 10.05.2017, Бюл. № 9.

87. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року. – С. 176-177.

88. Філюк Я.О. Вимірювання енергії сонячного випромінювання на широті Тернопільського регіону/ Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18 травня 2016 року. – С. 175.

89. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // VI Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 30 січня 2018 року. – С. 13-14.

90. Фотоэлектрический модуль. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://solar-tech.com.ua/image/data/Instructions/solar-panels/ALM\\_10-30-50%D0%9C.pdf](http://solar-tech.com.ua/image/data/Instructions/solar-panels/ALM_10-30-50%D0%9C.pdf)

91. ДСТУ EN 60904-1:2009. Фотоэлектрические приборы. Часть 1. Фотоэлектрические вольт-амперные характеристики. Методы измерения (EN 60904-1:2006, IDT)

92. Возняк О.Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О.Т. Возняк, М.Є. Янів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва: збірник наукових праць. – 2010. – № 664. – С. 7-10.

93. Козирський В.В. Інтенсивність сонячного випромінювання, спрямованого на похилу поверхню / В.В. Козирський, Л.В. Мартинюк // Науковий

вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 174(1). – С. 112-119.

94. Филенко В.В. До питання визначення дійсних геліоенергетичних ресурсів / В.В. Филенко // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 67-72.

95. Желих В.М. Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України / В.М. Желих, О.В. Омельчук, С.П. Шаповал, І.І. Венгрин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва: збірник наукових праць. – 2015. – № 823. – С. 117-121.

96. Коваль В.П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В.П. Коваль, Р.Р. Івасечко, К.М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.

97. Meteopost (2017). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://meteopost.com/weather/archive/>

98. Filyuk Y.O., Vladimir A.V., Analysis of the energy potential of solar light of the western region of ukraine with the account of climatic conditions / Y.O. Filyuk, A.V. Vladimir // EUREKA: PHYSICS AND ENGINEERING. – 2017. – №4. – С. 25-32.

99. Filyuk Y.O., Andriychuk V.A. Research of energy potential of solar radiation in Ternopil / Y.O. Filyuk, A.V. Vladimir // Scientific Journal of TNTU. TNTU. – 2017. – Vol 85. – No 1. – С. 95-100.

100. Філюк Я.О. Використання даних метеослужб для оцінки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали III всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року. – С. 233.

101. Квазар KV 250M. . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.kvazar.com/images/stories/production/KV\\_220-255\\_M.PDF](http://www.kvazar.com/images/stories/production/KV_220-255_M.PDF).

102. Filyuk Y.O., Andriychuk V.A. Autonomous power supply system for

outdoor illumination of residential areas in the territory of Ukraine / Y.O. Filyuk, A.V. Vladimir // Scientific Journal of TNTU. TNTU. – 2018. – Vol 89. – No 1. – P. 113-121.

103. Filyuk Y.O., Andriychuk V.A. Use of solar energy for the outdoor lighting of Ternopil / Y.O. Filyuk, A.V. Vladimir // Scientific Journal of TNTU. TNTU. – 2017. – Vol 87. – No 3. – P. 126-133.

104. Shenzhen LithPower Technology Co. [Електронний ресурс] Режим доступа: [http://www.globalsources.com/si/AS/Shenzhen-LithPower/6008849427\\_599/Homepage.htm](http://www.globalsources.com/si/AS/Shenzhen-LithPower/6008849427_599/Homepage.htm)

105. GROWATT 10000 HY гибридный солнечный инвертор. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://eco-tech.com.ua/p506011968-growatt-10000-gibridnyj.html>

106. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gorsvet.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/08/%D0%94%D0%91%D0%9D-%D0%92.2.5-28-2006.pdf>

107. DIALux 4.2 учебник. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dialux-help.ru/uchebnik/soderzhanie.html>

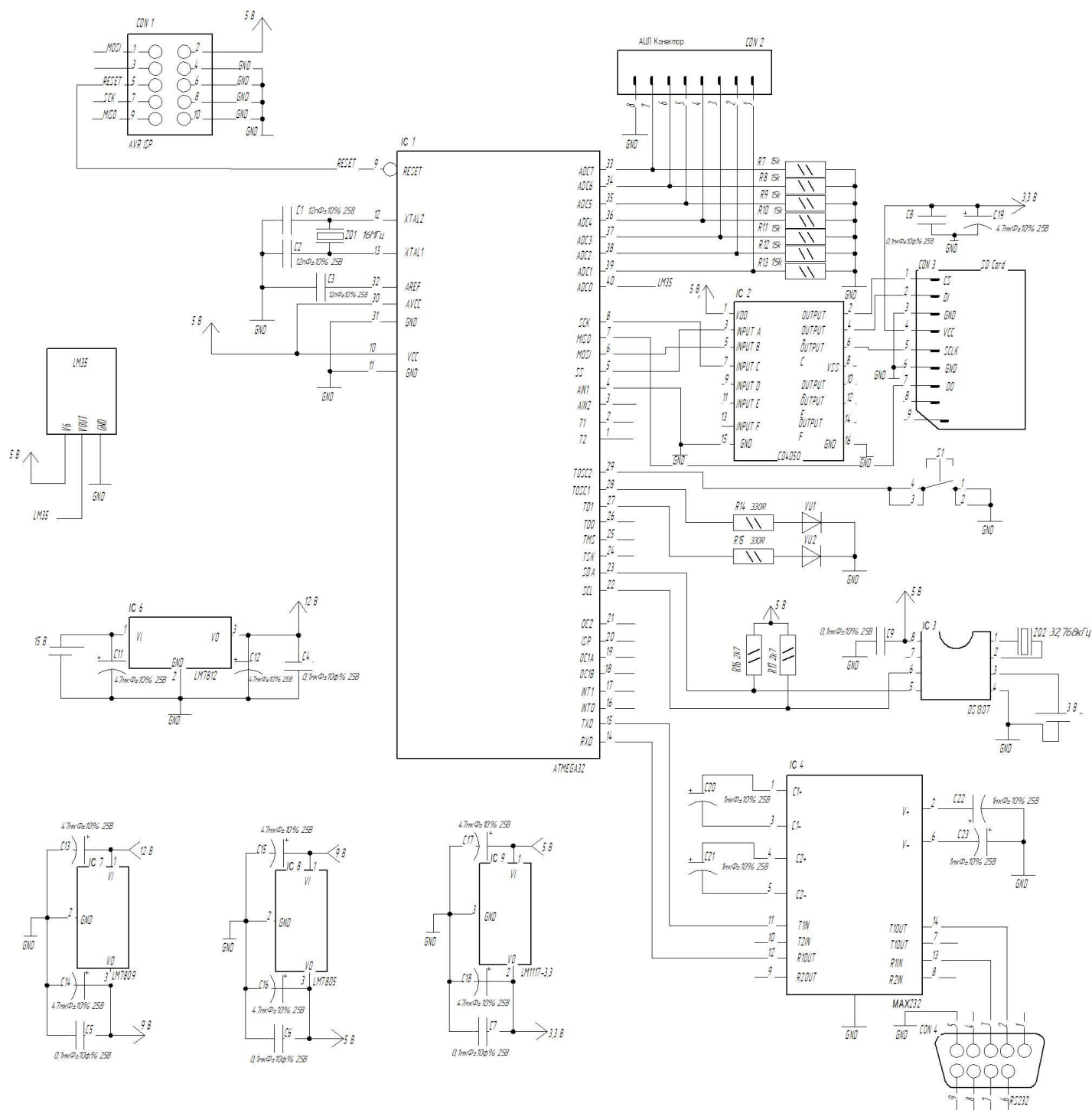
108. Каталог - світильники і прожектори Корпорації ВАТРА. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [https://vatra.ua/download/VATRA-2018-UKR\\_max-catalogue\\_\(lighting\).pdf](https://vatra.ua/download/VATRA-2018-UKR_max-catalogue_(lighting).pdf)

109. NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>



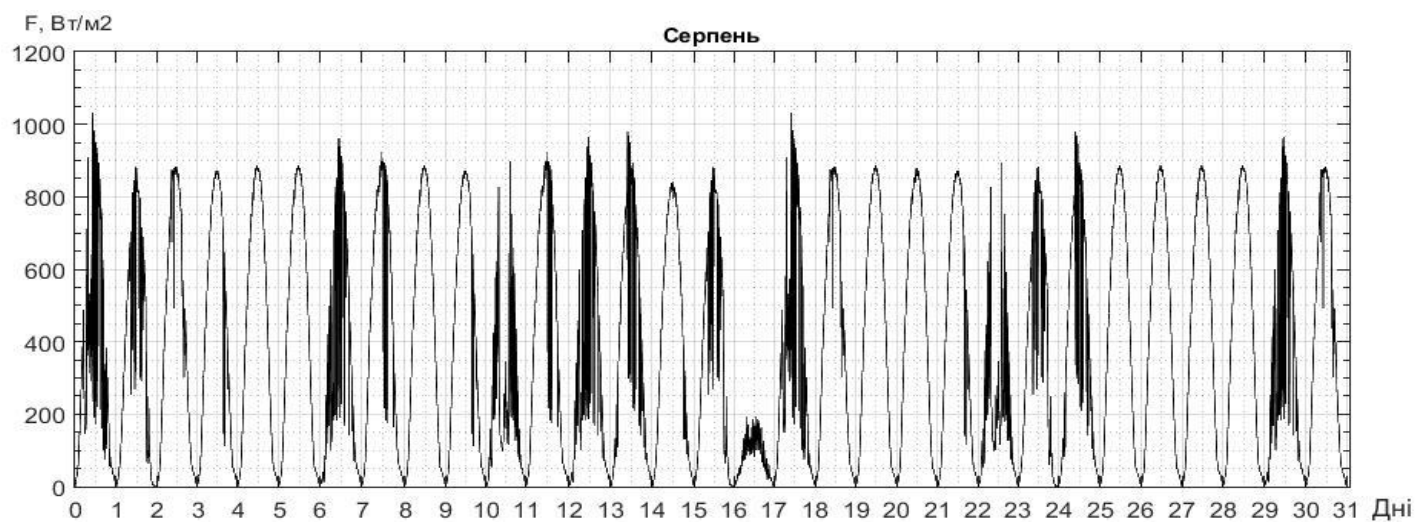
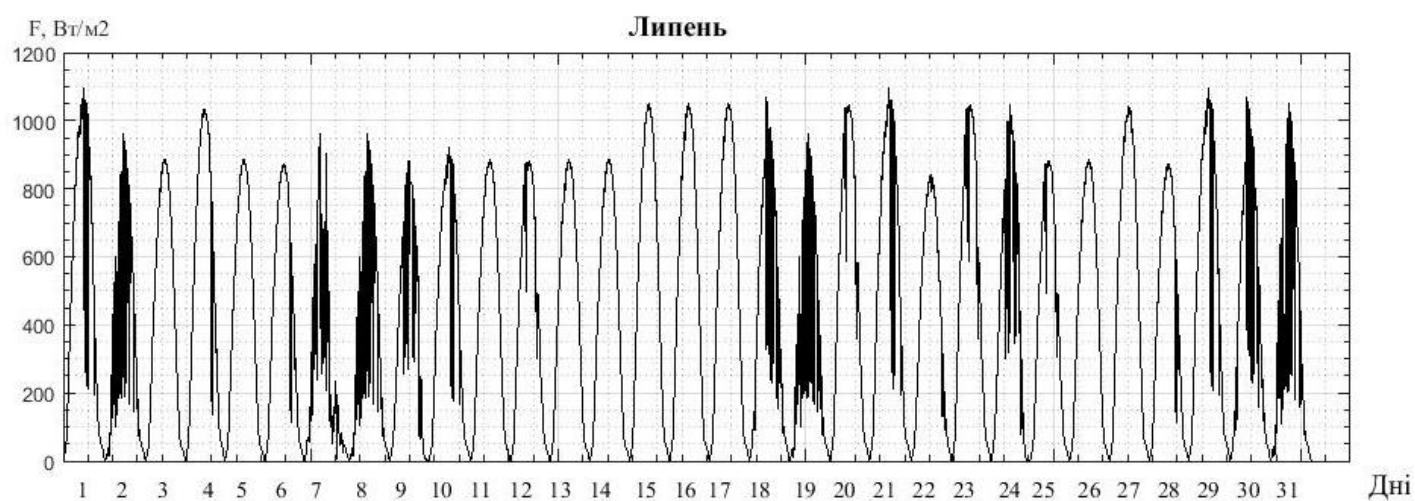
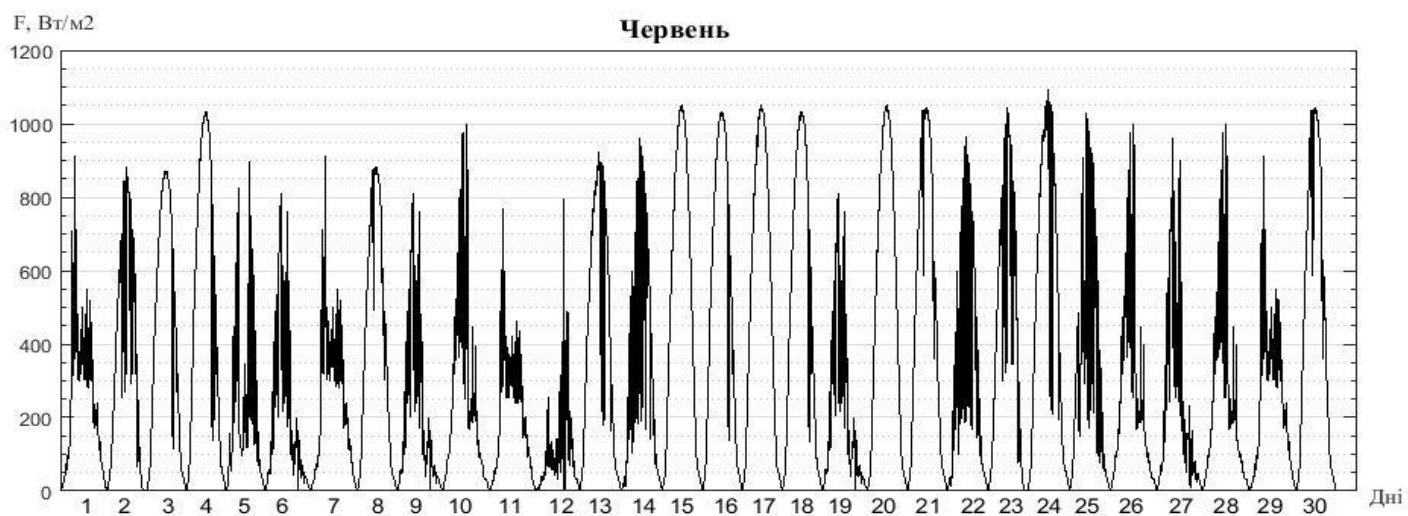
## Додаток А

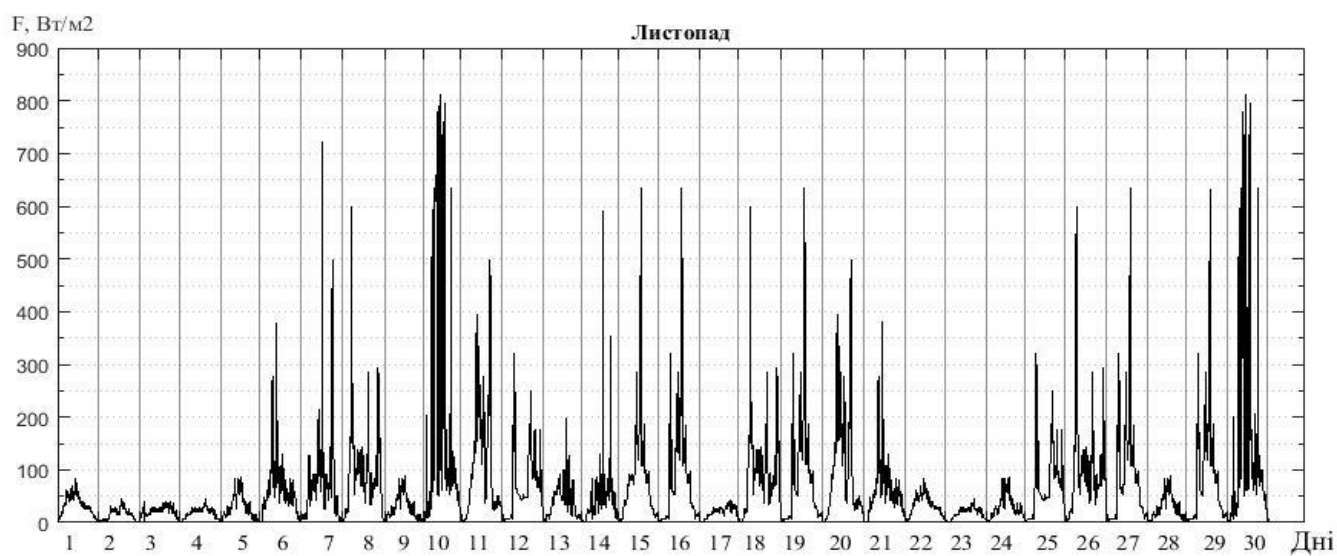
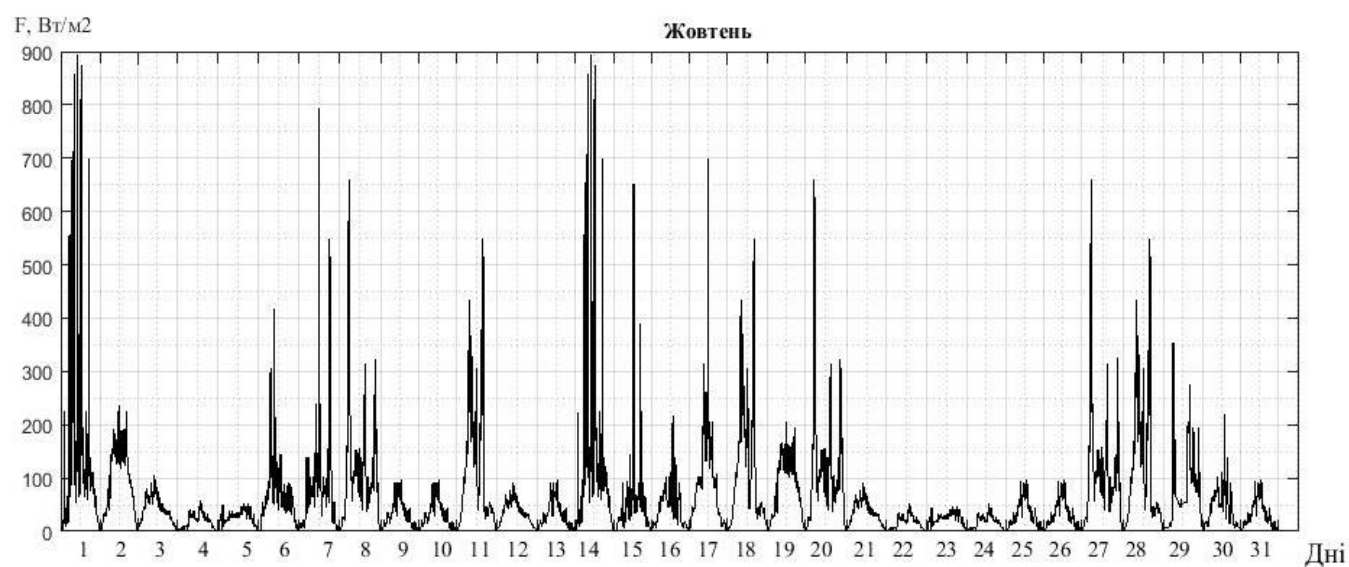
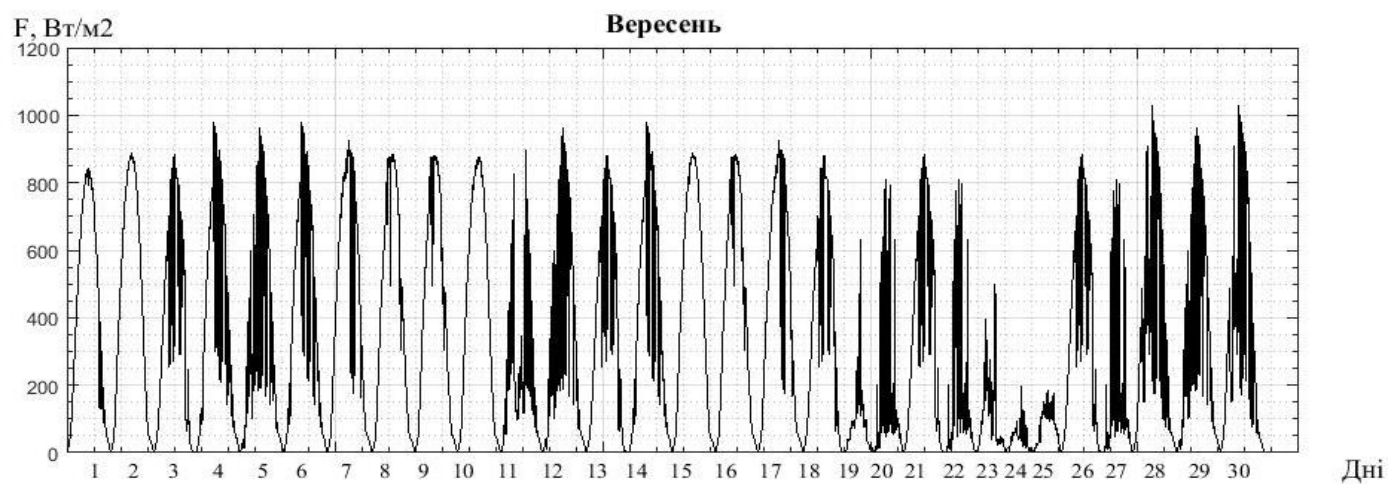
### Схема електрична принципова вимірювальної установки

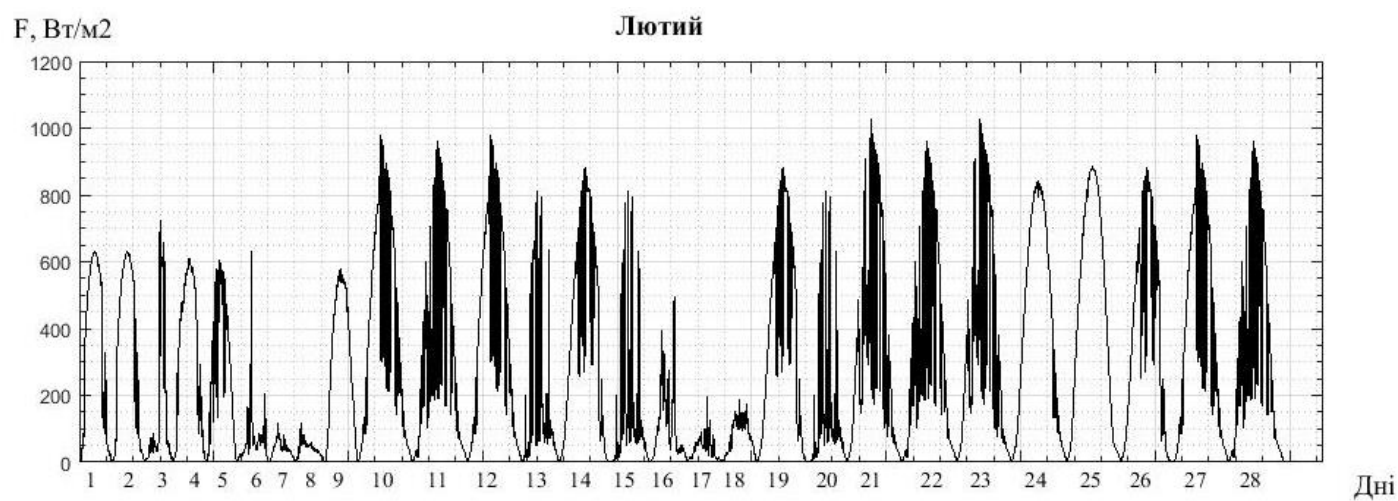
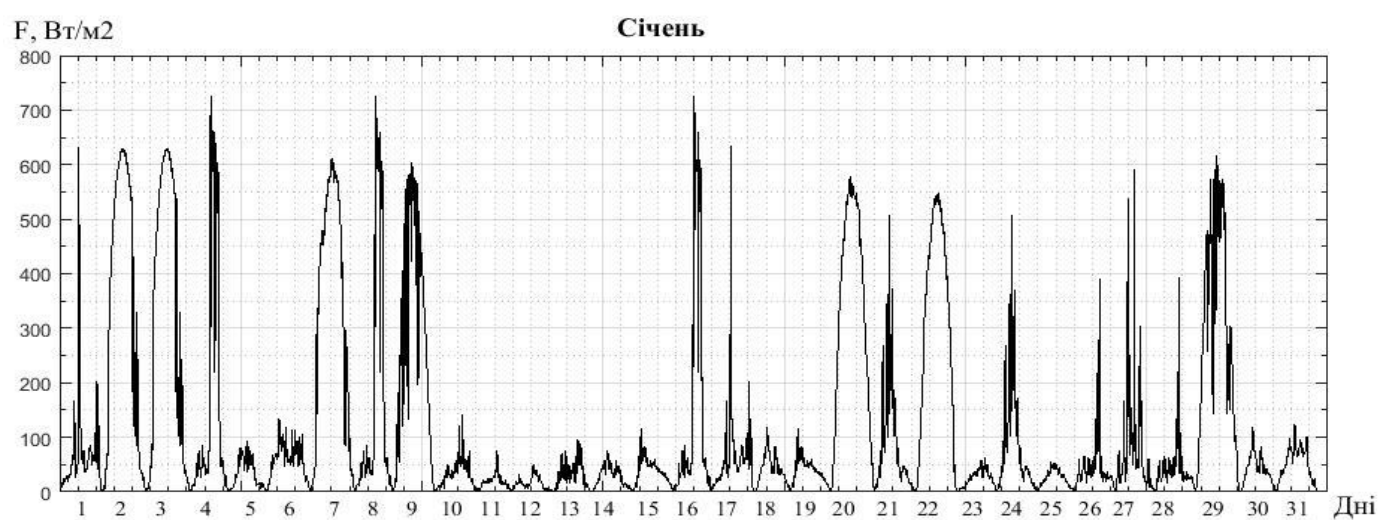
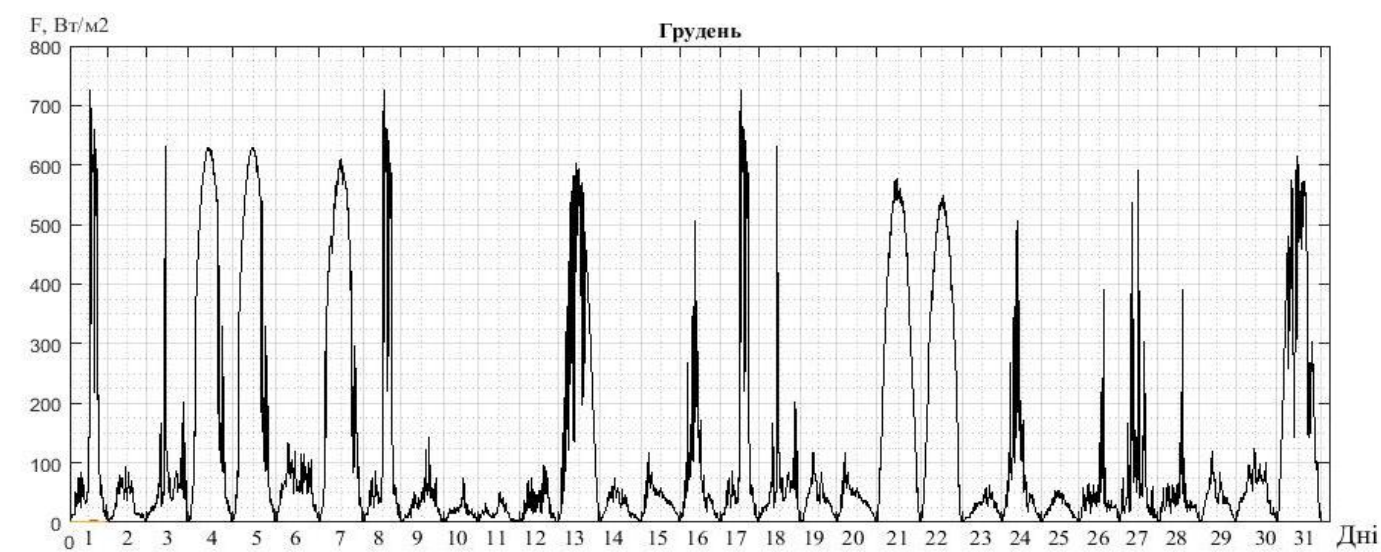


**Додаток Б**

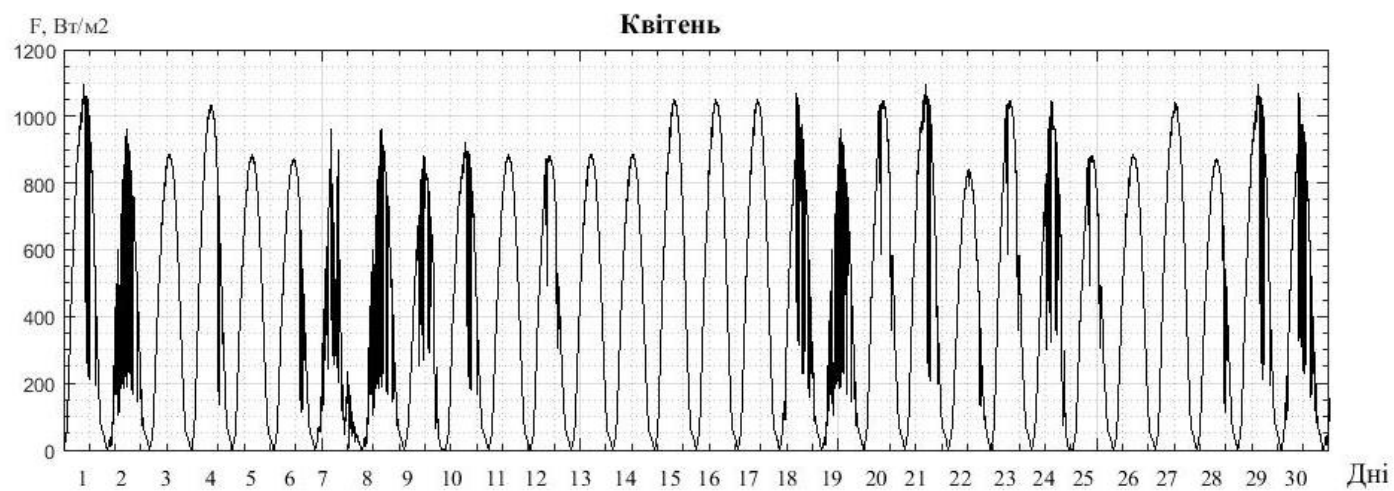
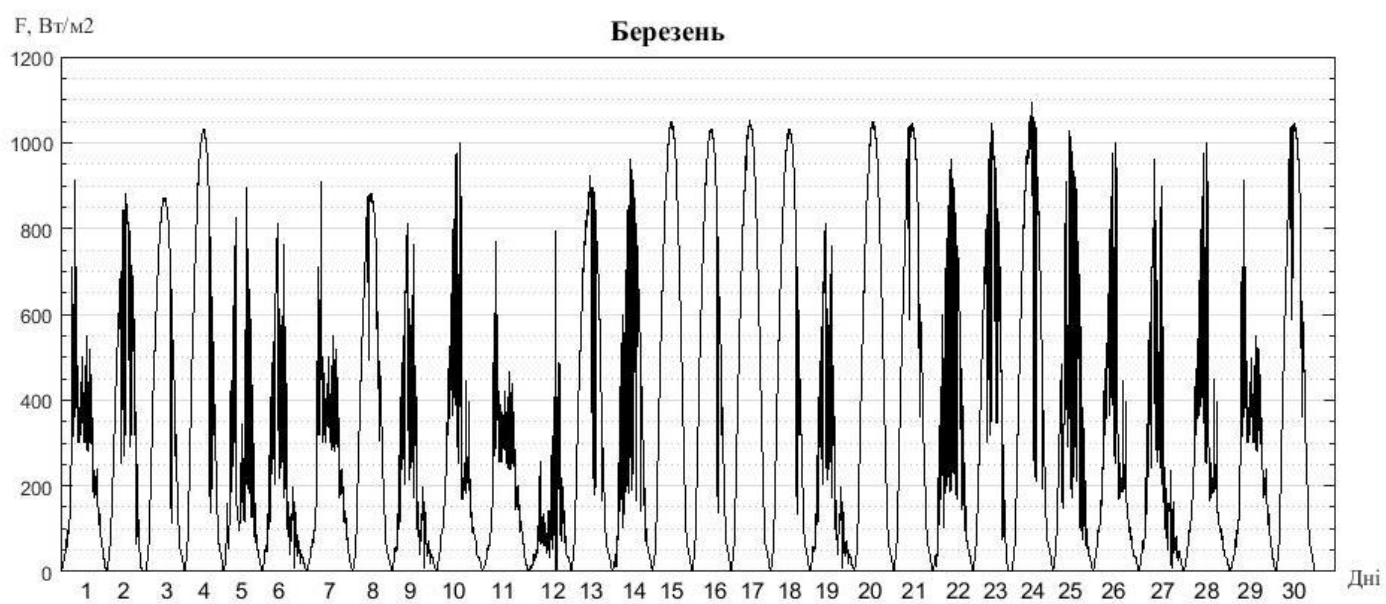
Зміни сонячної інсоляції по днях від червня 2016 по квітень 2017 року











### Додаток В

Середньодобове значення ступеня хмарності та розрахована середньодобова густина енергії сонячного випромінювання ( $E_{роз}$ ,  $кВт \cdot год / м^2$ ) протягом кожного місяця 2017 року, для м. Івано-Франківськ

м. Івано-Франківськ																								
Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
1	2	3,5	7	2,0	7	2,2	4	4,3	7	2,4	3	5,3	7	2,6	0	7,2	0	6,0	4	2,7	6	1,8	7	1,0
2	1	3,9	6	2,6	2	5,0	1	6,1	8	1,9	5	4,2	5	4,1	0	7,2	5	2,9	3	3,1	7	1,4	8	0,7
3	6	1,9	8	1,7	6	2,8	4	4,5	6	3,0	2	5,9	6	3,3	2	5,8	8	1,1	7	1,3	7	1,4	8	0,7
4	7	1,3	8	1,5	6	2,8	6	3,4	7	2,4	5	4,2	3	5,6	4	4,5	8	1,1	7	1,3	6	1,8	6	1,3
5	7	1,2	9	1,4	6	2,8	6	3,3	7	2,4	8	2,6	4	4,8	6	3,1	7	1,7	7	1,3	7	1,4	8	0,7
6	8	0,9	8	1,6	6	2,8	8	2,3	5	3,5	7	3,1	7	2,6	6	3,1	7	1,7	6	1,7	8	1,0	8	0,7
7	8	1,0	8	1,6	6	2,8	6	3,1	6	3,0	7	3,1	4	4,8	8	1,8	8	1,1	6	1,7	8	1,0	7	1,0
8	8	1,0	8	1,6	8	1,6	7	2,9	7	2,4	7	3,1	7	2,6	6	3,1	4	3,5	5	2,2	8	1,0	3	2,3
9	8	1,0	7	1,9	7	2,2	4	4,1	6	3,0	4	4,8	4	4,8	1	6,5	5	2,9	5	2,2	8	1,0	8	0,7
10	4	2,4	1	4,6	7	2,2	2	5,5	5	3,5	3	5,3	5	4,1	0	7,2	3	4,1	6	1,7	8	1,0	5	1,7
11	7	1,3	8	1,6	8	1,6	7	2,9	5	3,5	6	3,7	4	4,8	1	6,5	3	4,1	7	1,3	7	1,4	7	1,0
12	7	1,4	8	1,6	8	1,6	4	4,5	7	2,4	6	3,7	7	2,6	2	5,8	7	1,7	6	1,7	6	1,8	6	1,3
13	7	1,4	7	1,9	8	1,6	7	2,7	8	1,9	4	4,8	6	3,3	8	1,8	6	2,3	5	2,2	7	1,4	8	0,7
14	8	1,0	6	2,4	8	1,6	6	3,5	7	2,4	6	3,7	4	4,8	5	3,8	2	4,8	6	1,7	8	1,0	8	0,7

Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
15	5	2,0	5	2,8	6	2,8	5	3,8	5	3,5	4	4,8	7	2,6	1	6,5	5	2,9	7	1,3	6	1,8	7	1,0
16	2	3,5	6	2,3	6	2,8	7	2,9	6	3,0	6	3,7	6	3,3	3	5,2	5	2,9	0	4,6	8	1,0	8	0,7
17	8	0,9	7	2,2	6	2,8	5	3,9	4	4,1	8	2,6	2	6,4	5	3,8	6	2,3	1	4,1	8	1,0	7	1,0
18	7	1,3	8	1,8	8	1,6	5	3,8	3	4,6	5	4,2	5	4,1	3	5,2	4	3,5	4	2,7	8	1,0	8	0,7
19	8	0,9	5	2,7	7	2,2	8	2,3	6	3,0	4	4,8	4	4,8	3	5,2	7	1,7	6	1,7	7	1,4	8	0,7
20	7	1,5	5	2,9	8	1,6	8	2,2	3	4,6	4	4,8	3	5,6	6	3,1	7	1,7	1	4,1	6	1,8	8	0,7
21	8	1,0	8	1,7	5	3,3	5	4,0	7	2,4	5	4,2	6	3,3	8	1,8	7	1,7	8	0,8	7	1,4	8	0,7
22	8	0,9	6	2,4	4	3,9	7	2,8	5	3,5	4	4,8	7	2,6	6	3,1	8	1,1	8	0,8	8	1,0	7	1,0
23	8	0,9	7	1,9	8	1,6	7	2,9	4	4,1	7	3,1	5	4,1	6	3,1	7	1,7	8	0,8	7	1,4	7	1,0
24	3	3,0	5	2,7	7	2,2	6	3,1	7	2,4	6	3,7	4	4,8	5	3,8	8	1,1	8	0,8	9	0,6	7	1,0
25	8	0,9	4	3,2	6	2,8	4	4,5	7	2,4	5	4,2	7	2,6	5	3,8	7	1,7	7	1,3	9	0,6	7	1,0
26	4	2,6	7	2,2	7	2,2	7	2,9	5	3,5	6	3,7	6	3,3	4	4,5	6	2,3	6	1,7	8	1,0	4	2,0
27	3	3,1	4	3,3	4	3,9	6	3,0	6	3,0	5	4,2	6	3,3	6	3,1	5	2,9	8	0,8	8	1,0	6	1,3
28	6	1,7	5	2,9	4	3,9	7	2,9	3	4,6	4	4,8	5	4,1	6	3,1	4	3,5	7	1,3	8	1,0	6	1,3
29	8	0,9			4	3,9	8	2,3	3	4,6	5	4,2	4	4,8	4	4,5	1	5,4	7	1,3	8	1,0	7	1,0
30	8	0,9			7	2,2	8	2,2	6	3,0	4	4,8	2	6,4	0	7,2	2	4,8	6	1,7	8	1,0	7	1,0
31	8	0,9			3	4,4			5	3,5			1	7,1	0	7,2			5	2,2			7	1,0

Середньодобове значення ступеня хмарності та розрахована середньодобова густина енергії сонячного випромінювання ( $E_{роз}$ ,  $кВт \cdot год/м^2$ ) протягом кожного місяця 2017 року, для м. Чернівці

м. Чернівці																								
Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
1	1	3,7	5	2,8	7	2,2	1	5,9	7	2,4	3	5,3	5	4	0	7,2	0	6,0	0	4,6	6	1,8	7	1,0
2	5	2,1	7	2,0	2	4,8	0	6,5	5	3,5	5	4,2	3	6	0	7,2	5	2,9	0	4,6	5	2,2	8	0,7
3	4	2,5	7	2,0	5	3,3	0	6,5	3	4,6	2	5,9	5	4	1	6,5	7	1,7	4	2,7	6	1,8	8	0,7
4	6	1,7	8	1,7	5	3,3	6	3,2	5	3,5	2	5,9	3	6	3	5,2	6	2,3	5	2,2	5	2,2	6	1,3
5	6	1,7	8	1,7	7	2,2	5	3,8	7	2,4	5	4,2	3	6	4	4,5	4	3,5	6	1,7	5	2,2	7	1,0
6	8	1,0	8	1,7	7	2,2	6	3,2	4	4,1	5	4,2	6	3	7	2,5	7	1,7	6	1,7	8	1,0	8	0,7
7	7	1,3	8	1,7	5	3,3	7	2,7	6	3,0	6	3,7	3	6	7	2,5	5	2,9	5	2,2	8	1,0	6	1,3
8	8	1,0	8	1,7	7	2,2	7	2,7	7	2,4	7	3,1	6	3	5	3,8	4	3,5	7	1,3	8	1,0	1	2,9
9	8	1,0	6	2,4	8	1,7	4	4,3	7	2,4	4	4,8	4	5	4	4,5	5	2,9	3	3,1	8	1,0	6	1,3
10	4	2,5	0	4,8	8	1,7	1	5,9	4	4,1	3	5,3	5	4	0	7,2	3	4,1	5	2,2	7	1,4	6	1,3
11	8	1,0	8	1,7	8	1,7	4	4,3	3	4,6	4	4,8	5	4	0	7,2	2	4,8	5	2,2	4	2,6	6	1,3
12	6	1,7	8	1,7	7	2,2	4	4,3	6	3,0	5	4,2	4	5	1	6,5	5	2,9	5	2,2	6	1,8	6	1,3
13	7	1,3	8	1,7	7	2,2	6	3,2	7	2,4	6	3,7	5	4	5	3,8	4	3,5	4	2,7	7	1,4	7	1,0
14	6	1,7	6	2,4	7	2,2	5	3,8	7	2,4	6	3,7	3	6	7	2,5	1	5,4	6	1,7	8	1,0	6	1,3



Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
15	7	1,3	5	2,8	6	2,8	3	4,9	2	5,2	5	4,2	6	3	6	3,1	3	4,1	6	1,7	7	1,4	6	1,3
16	8	1,0	8	1,7	6	2,8	7	2,7	6	3,0	4	4,8	5	4	5	3,8	4	3,5	1	4,1	8	1,0	7	1,0
17	8	1,0	8	1,7	6	2,8	6	3,2	4	4,1	7	3,1	2	6	4	4,5	5	2,9	0	4,6	8	1,0	7	1,0
18	6	1,7	8	1,7	7	2,2	5	3,8	4	4,1	7	3,1	5	4	2	5,8	3	4,1	2	3,6	8	1,0	7	1,0
19	4	2,5	3	3,6	5	3,3	8	2,2	2	5,2	4	4,8	3	6	0	7,2	6	2,3	4	2,7	6	1,8	7	1,0
20	7	1,3	8	1,7	8	1,7	8	2,2	5	3,5	3	5,3	0	8	0	7,2	5	2,9	0	4,6	5	2,2	8	0,7
21	8	1,0	7	2,0	6	2,8	4	4,3	6	3,0	6	3,7	3	6	7	2,5	6	2,3	7	1,3	5	2,2	7	1,0
22	8	1,0	4	3,2	5	3,3	6	3,2	3	4,6	4	4,8	4	5	5	3,8	8	1,1	8	0,8	7	1,4	7	1,0
23	4	2,5	5	2,8	7	2,2	7	2,7	2	5,2	7	3,1	5	4	5	3,8	6	2,3	8	0,8	6	1,8	7	1,0
24	4	2,5	6	2,4	6	2,8	5	3,8	5	3,5	6	3,7	6	3	4	4,5	7	1,7	8	0,8	8	1,0	5	1,7
25	8	1,0	4	3,2	6	2,8	5	3,8	8	1,9	4	4,8	6	3	4	4,5	7	1,7	4	2,7	6	1,8	5	1,7
26	2	3,3	6	2,4	6	2,8	5	3,8	7	2,4	5	4,2	7	3	4	4,5	4	3,5	6	1,7	8	1,0	2	2,6
27	5	2,1	3	3,6	3	4,3	6	3,2	6	3,0	3	5,3	7	3	4	4,5	5	2,9	7	1,3	8	1,0	5	1,7
28	8	1,0	4	3,2	2	4,8	6	3,2	4	4,1	2	5,9	6	3	4	4,5	6	2,3	5	2,2	8	1,0	5	1,7
29	8	1,0			6	2,8	7	2,7	3	4,6	4	4,8	3	6	4	4,5	1	5,4	6	1,7	8	1,0	6	1,3
30	8	1,0			4	3,8	8	2,2	5	3,5	3	5,3	1	7	0	7,2	0	6,0	5	2,2	7	1,4	7	1,0
31	6	1,7			2	4,8			5	3,5			0	8	0	7,2			5	2,2			6	1,3

Середньодобове значення ступеня хмарності та розрахована середньодобова густина енергії сонячного випромінювання ( $E_{роз}$ ,  $кВт \cdot год/м^2$ ) протягом кожного місяця 2017 року, для м. Хмельницьк

м. Чернівці																								
Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
	Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	
1	2	3,3	6	2,4	4	3,8	4	4,3	7	2,4	3	5,3	5	4,1	1	6,5	0	6,0	6	1,7	7	1,4	6	1,3
2	2	3,3	5	2,8	4	3,8	1	5,9	4	4,1	6	3,7	3	5,6	1	6,5	2	4,8	4	2,7	8	1,0	7	1,0
3	5	2,1	6	2,4	5	3,3	2	5,4	4	4,1	4	4,8	2	6,4	3	5,2	3	4,1	5	2,2	7	1,4	8	0,7
4	7	1,3	7	2,0	6	2,8	4	4,3	2	5,2	4	4,8	4	4,8	3	5,2	5	2,9	5	2,2	5	2,2	7	1,0
5	7	1,3	8	1,7	6	2,8	4	4,3	4	4,1	5	4,2	5	4,1	4	4,5	7	1,7	7	1,3	4	2,6	7	1,0
6	8	1,0	8	1,7	5	3,3	6	3,2	2	5,2	5	4,2	6	3,3	6	3,1	6	2,3	6	1,7	5	2,2	6	1,3
7	8	1,0	8	1,7	4	3,8	8	2,2	5	3,5	6	3,7	5	4,1	8	1,8	6	2,3	5	2,2	6	1,8	2	2,6
8	7	1,3	6	2,4	5	3,3	7	2,7	3	4,6	4	4,8	5	4,1	4	4,5	5	2,9	4	2,7	7	1,4	0	3,3
9	6	1,7	5	2,8	6	2,8	5	3,8	4	4,1	3	5,3	4	4,8	2	5,8	4	3,5	6	1,7	8	1,0	3	2,3
10	7	1,3	0	4,8	7	2,2	2	5,4	4	4,1	3	5,3	5	4,1	1	6,5	6	2,3	6	1,7	8	1,0	5	1,7
11	7	1,3	5	2,8	7	2,2	3	4,9	3	4,6	4	4,8	6	3,3	0	7,2	2	4,8	5	2,2	8	1,0	6	1,3
12	7	1,3	7	2,0	8	1,7	5	3,8	5	3,5	5	4,2	6	3,3	0	7,2	6	2,3	5	2,2	7	1,4	7	1,0
13	6	1,7	5	2,8	7	2,2	7	2,7	2	5,2	4	4,8	3	5,6	2	5,8	6	2,3	4	2,7	7	1,4	8	0,7
14	8	1,0	4	3,2	6	2,8	6	3,2	3	4,6	5	4,2	3	5,6	7	2,5	3	4,1	4	2,7	6	1,8	8	0,7

Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
15	4	2,5	6	2,4	5	3,3	6	3,2	3	4,6	5	4,2	5	4,1	5	3,8	3	4,1	3	3,1	5	2,2	7	1,0
16	4	2,5	7	2,0	6	2,8	7	2,7	5	3,5	6	3,7	6	3,3	7	2,5	5	2,9	1	4,1	4	2,6	7	1,0
17	7	1,3	8	1,7	6	2,8	4	4,3	2	5,2	6	3,7	3	5,6	4	4,5	5	2,9	0	4,6	5	2,2	7	1,0
18	8	1,0	7	2,0	8	1,7	4	4,3	3	4,6	5	4,2	4	4,8	3	5,2	2	4,8	0	4,6	6	1,8	8	0,7
19	8	1,0	6	2,4	7	2,2	7	2,7	3	4,6	4	4,8	5	4,1	1	6,5	5	2,9	4	2,7	7	1,4	8	0,7
20	7	1,3	8	1,7	7	2,2	8	2,2	4	4,1	4	4,8	4	4,8	5	3,8	6	2,3	6	1,7	4	2,6	8	0,7
21	8	1,0	8	1,7	6	2,8	1	5,9	3	4,6	5	4,2	3	5,6	8	1,8	7	1,7	7	1,3	6	1,8	7	1,0
22	8	1,0	7	2,0	5	3,3	7	2,7	2	5,2	5	4,2	5	4,1	6	3,1	8	1,1	7	1,3	7	1,4	7	1,0
23	7	1,3	7	2,0	7	2,2	6	3,2	3	4,6	6	3,7	5	4,1	7	2,5	7	1,7	7	1,3	6	1,8	6	1,3
24	6	1,7	6	2,4	7	2,2	6	3,2	5	3,5	6	3,7	5	4,1	6	3,1	7	1,7	5	2,2	5	2,2	7	1,0
25	5	2,1	6	2,4	5	3,3	6	3,2	6	3,0	4	4,8	5	4,1	3	5,2	6	2,3	3	3,1	8	1,0	5	1,7
26	3	2,9	6	2,4	5	3,3	6	3,2	6	3,0	5	4,2	6	3,3	5	3,8	6	2,3	5	2,2	8	1,0	2	2,6
27	7	1,3	4	3,2	4	3,8	7	2,7	5	3,5	4	4,8	7	2,6	5	3,8	5	2,9	6	1,7	8	1,0	4	2,0
28	7	1,3	4	3,2	4	3,8	6	3,2	4	4,1	2	5,9	5	4,1	6	3,1	2	4,8	6	1,7	8	1,0	5	1,7
29	8	1,0			5	3,3	6	3,2	3	4,6	4	4,8	4	4,8	4	4,5	1	5,4	7	1,3	8	1,0	7	1,0
30	7	1,3			4	3,8	8	2,2	4	4,1	3	5,3	2	6,4	3	5,2	0	6,0	6	1,7	7	1,4	7	1,0
31	7	1,3			4	3,8			5	3,5			0	7,9	0	7,2			6	1,7			7	1,0

Середньодобове значення ступеня хмарності та розрахована середньодобова густина енергії сонячного випромінювання ( $E_{роз}$ ,  $кВт\cdot год/м^2$ ) протягом кожного місяця 2017 року, для м. Львів

м. Чернівці																								
Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
	Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N
1	0	4,0	8	1,7	4	3,8	4	4,3	6	3,0	2	5,9	6	3,3	0	7,2	1	5,4	0	4,6	7	1,4	4	2,0
2	3	2,9	8	1,7	3	4,3	0	6,5	6	3,0	5	4,2	4	4,8	3	5,2	4	3,5	0	4,6	7	1,4	5	1,7
3	6	1,7	8	1,7	4	3,8	4	4,3	5	3,5	3	5,3	6	3,3	4	4,5	6	2,3	7	1,3	8	1,0	8	0,7
4	7	1,3	8	1,7	5	3,3	5	3,8	4	4,1	4	4,8	5	4,1	3	5,2	7	1,7	6	1,7	6	1,8	7	1,0
5	8	1,0	8	1,7	4	3,8	6	3,2	5	3,5	7	3,1	4	4,8	4	4,5	7	1,7	7	1,3	5	2,2	8	0,7
6	6	1,7	8	1,7	4	3,8	8	2,2	3	4,6	6	3,7	5	4,1	4	4,5	6	2,3	6	1,7	4	2,6	8	0,7
7	4	2,5	8	1,7	5	3,3	7	2,7	4	4,1	6	3,7	5	4,1	7	2,5	5	2,9	5	2,2	6	1,8	7	1,0
8	6	1,7	8	1,7	6	2,8	5	3,8	6	3,0	6	3,7	7	2,6	4	4,5	5	2,9	6	1,7	8	1,0	1	2,9
9	8	1,0	8	1,7	7	2,2	4	4,3	5	3,5	4	4,8	4	4,8	3	5,2	3	4,1	5	2,2	8	1,0	8	0,7
10	5	2,1	1	4,4	7	2,2	1	5,9	4	4,1	3	5,3	5	4,1	1	6,5	4	3,5	5	2,2	8	1,0	6	1,3
11	7	1,3	2	4,0	7	2,2	6	3,2	5	3,5	5	4,2	5	4,1	0	7,2	4	3,5	6	1,7	7	1,4	5	1,7
12	8	1,0	8	1,7	8	1,7	6	3,2	6	3,0	6	3,7	5	4,1	2	5,8	5	2,9	5	2,2	6	1,8	6	1,3
13	7	1,3	6	2,4	8	1,7	6	3,2	5	3,5	5	4,2	7	2,6	8	1,8	6	2,3	5	2,2	7	1,4	8	0,7
14	8	1,0	5	2,8	7	2,2	6	3,2	5	3,5	5	4,2	4	4,8	4	4,5	2	4,8	6	1,7	8	1,0	6	1,3

Місяць	Січень		Лютий		Березень		Квітень		Травень		Червень		Липень		Серпень		Вересень		Жовтень		Листопад		Грудень	
Дні	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>	N	E <sub>роз</sub>
16	4	2,5	1	4,4	6	2,8	6	3,2	3	4,6	7	3,1	4	4,8	0	7,2	5	2,9	1	4,1	4	2,6	7	1,0
17	8	1,0	7	2,0	7	2,2	3	4,9	2	5,2	6	3,7	4	4,8	4	4,5	6	2,3	0	4,6	7	1,4	5	1,7
18	8	1,0	8	1,7	7	2,2	6	3,2	3	4,6	4	4,8	3	5,6	4	4,5	3	4,1	2	3,6	8	1,0	5	1,7
19	7	1,3	5	2,8	7	2,2	7	2,7	2	5,2	4	4,8	3	5,6	3	5,2	5	2,9	4	2,7	6	1,8	8	0,7
20	8	1,0	3	3,6	8	1,7	7	2,7	3	4,6	3	5,3	4	4,8	7	2,5	6	2,3	8	0,8	7	1,4	8	0,7
21	8	1,0	8	1,7	6	2,8	4	4,3	3	4,6	4	4,8	5	4,1	6	3,1	7	1,7	8	0,8	6	1,8	8	0,7
22	8	1,0	8	1,7	6	2,8	7	2,7	2	5,2	4	4,8	5	4,1	6	3,1	8	1,1	8	0,8	8	1,0	7	1,0
23	9	0,6	8	1,7	6	2,8	6	3,2	4	4,1	6	3,7	5	4,1	7	2,5	7	1,7	8	0,8	5	2,2	7	1,0
24	6	1,7	7	2,0	8	1,7	6	3,2	7	2,4	6	3,7	5	4,1	5	3,8	7	1,7	7	1,3	3	3,0	7	1,0
25	8	1,0	6	2,4	7	2,2	5	3,8	5	3,5	4	4,8	6	3,3	5	3,8	6	2,3	6	1,7	6	1,8	7	1,0
26	5	2,1	7	2,0	6	2,8	6	3,2	5	3,5	6	3,7	4	4,8	5	3,8	5	2,9	5	2,2	8	1,0	2	2,6
27	2	3,3	5	2,8	4	3,8	6	3,2	5	3,5	4	4,8	4	4,8	5	3,8	4	3,5	8	0,8	8	1,0	4	2,0
28	5	2,1	4	3,2	4	3,8	7	2,7	3	4,6	4	4,8	4	4,8	6	3,1	3	4,1	7	1,3	7	1,4	6	1,3
29	9	0,6			4	3,8	8	2,2	3	4,6	5	4,2	4	4,8	5	3,8	2	4,8	6	1,7	7	1,4	8	0,7
30	8	1,0			5	3,3	7	2,7	3	4,6	3	5,3	0	7,9	0	7,2	4	3,5	7	1,3	8	1,0	6	1,3
31	3	2,9			2	4,8			2	5,2			1	7,1	0	7,2			5	2,2			6	1,3

## Додаток Г

### Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор

ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА»

В.В. Щиренко

12 2018 р.



## АКТ

### впровадження методики розрахунку освітлювальної установки з автономним живленням для зовнішнього освітлення населених пунктів

Розроблена на кафедрі електричної інженерії Тернопільського Національного Технічного Університету ім. І. Пулюя методика розрахунку освітлювальної установки з автономним живленням на основі світлодіодних джерел світла і сонячних батарей, була використана на ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА» при розробці проектів зовнішнього освітлення населених пунктів з використанням продукції, виготовленої на підприємстві.

Від ТНТУ ім. І. Пулюя

Науковий керівник роботи

д.т.н., проф..

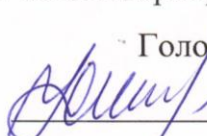
 В.А. Андрійчук

Відповідальний виконавець

 Я.О. Філюк

Від ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА»

Головний технолог

 І.П. Сидько

Головний конструктор

 С.В. Пилипчик

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Перший проректор

Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя

доц. М.М. Митник

» \_\_\_\_\_ 2019 р.

### АКТ

**Впровадження методики визначення енергетичного потенціалу  
сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов місцевості  
в процес підготовки фахівців за спеціальністю "Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка"**

Розроблена методика визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов місцевості впроваджена у викладання предметів «Енергозбереження» та «Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії» для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Дана методика дала можливість підвищити рівень практичної підготовки студентів.

Акт про впровадження обговорений та затверджений на засіданні кафедри електричної інженерії протоколом №4 від «27» \_\_11\_\_ 2018 року.

Завідувач кафедри  
електричної інженерії  
д.т.н., проф.

Тарасенко М.Г.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Лановецький міський голова



Казновецький Р.В.

2019 р.

**АКТ**

**впровадження проекту освітлювальної установки з автономним живленням на основі сонячних батарей для зовнішнього освітлення**

Розроблений на кафедрі електричної інженерії Тернопільського Національного Технічного Університету ім. І. Пулюя проект освітлювальної установки з автономним живленням буде впроваджений для зовнішнього освітлення населених пунктів Лановецької міської ради (об'єднаної територіальної громади) та м. Ланівці, що дозволить зекономити бюджетні кошти та підвищити стабільність освітлення і комфортність мешканців громади.

Від ТНТУ ім. І. Пулюя

Науковий керівник роботи

д.т.н., проф..

 В.А. Андрійчук

Відповідальний виконавець

 Я.О. Філюк